

Effektanalys av några skogliga åtgärders påverkan på kolsänkan

Kunskapsunderlag



© Skogsstyrelsen 2023

Rapport 2023/10

Projektledare

Johan Wester

Författare

Giuliana Zanchi

Andreas Eriksson

Projektgrupp

Giuliana Zanchi

Andreas Drott

Andreas Eriksson

Tommy Mörling

Carin Nilsson

Per-Erik Wikberg

Omslagsbild

Patrik Svedberg

Skogsstyrelsens rapporter publiceras som PDF-filer på vår webbplats: www.skogsstyrelsen.se.
Här kan även tidigare publicerade rapporter, liksom böcker och övriga trycksaker laddas ner eller beställas.

Innehåll

Förord	4
Sammanfattning	5
Summary	8
1 Inledning	11
1.1 Syfte	11
1.2 Avgränsningar	12
1.3 Klimatmål	13
1.4 Samspel med andra miljömål	13
2 Metoder	19
2.1 Utvalda åtgärder	19
2.2 Modellsimulering	20
2.2.1 Simulerat skogsbruk	20
2.2.2 Heureka RegVis	22
2.2.3 Klimatförändringar och risk för skador	23
2.2.4 Kolbalansen	24
3 Resultat	25
3.1 Tillväxt och avgång	25
3.2 Virkesförråd	29
3.3 Kolflöden och kolförråd	31
3.3.1 Kolflöden	31
3.3.2 Kolförråd	36
4 Diskussion	39
5 Slutsatser	46
6 Referenser	48

Förord

Skogens roll som kolsänka är en aktuell och viktig del i klimatarbetet. Det finns behov av att öka förståelse och kunskap om hur olika skogliga åtgärder påverkar kolinlagring och avgång av koldioxid i skogen.

I rapporten redovisas uppskattade effekter av skogliga åtgärder för ökad kolsänka baserat på analyser som genomförts inom Skogliga Konsekvensanalyser 2022 (SKA 22). De åtgärder som tagits med i rapporten ska inte uppfattas som Skogsstyrelsens förslag på vad som bör göras, utan rapporten utgör ett kunskapsunderlag.

Rapporten har tagits fram på initiativ av Skogsstyrelsen i anslutning till regeringsuppdrag att strategiskt planera arbetet för ökad kolsänka. Huvudrapporten för det uppdraget redovisades i december 2022 tillsammans med delrapporten Översikt av skogliga åtgärder för ökad kolsänka som ger ytterligare kunskapsunderlag.

Vi riktar ett varmt tack till alla medarbetare och andra medverkande för stora arbetsinsatser och värdefulla bidrag. Vi vill särskilt tacka medverkande från SLU för ett konstruktivt och värdefullt samarbete.

Jönköping, 2023-08-17

Magnus Viklund
Enhetschef

Giuliana Zanchi
Klimatspecialist

Sammanfattning

Den här rapporten syftar till att beskriva effekten av några utvalda skogliga åtgärder på skogens kolbalans, i jämförelse med dagens skogsbruk. Resultaten baseras på modellsimuleringar som genomfördes av SLU i beslutsstödsystemet Heureka RegVis inom projektet ”Skogliga konsekvensanalyser - SKA 22”. Åtgärderna som analyseras i denna rapport ingår bland de åtgärder som användes inom de befintliga SKA-scenarierna och bedömdes ha potential att påverka kolsänkan i skogen. Rapporten innehåller en kvantitativ analys av effekter av åtgärderna på skogens tillväxt, virkesförråd, avverkning och naturlig avgång samt på kolförrådet i och kolflöden från olika kolpooler, inklusive träprodukter. På grund av osäkerhet i simuleringen av markkol exkluderades effekterna av åtgärderna på kol i marken i rapporten. Resultaten är begränsade till effekter på kolsänkan i svenska skogar, och inkluderar inte läckageeffekter eller substitution. De effekterna diskuteras kvalitativt.

Åtgärderna som analyseras var för sig är:

- att minska viltskador i ungskog så att de halveras från 12 till 5 procent (Vsk-);
- förlängda omloppstider genom att den lägsta åldern för förnygringsavverkning höjs med 30 procent (LÅF+);
- andel av förnygrad areal med björk som är 3 gånger högre än idag (Löv+);
- andel virkesproduktionsmark som brukas med hyggesfria metoder (luckhuggning och selektiv avverkning¹) är ungefär en fjärdedel, jämfört med 4 procent idag (HF+);
- arealen som kvävegödsas blir 4,5 gånger högre än idag (GS+);
- arealen naturvårdsavsättningar fördubblas (Skydd+);
- avverkning minskar med 10 procent jämfört med dagens avverkning (Avv90%).

Förutom för Avv90%, eftersträvades i simuleringarna att behålla samma avverkningsvolym som den senast tillgängliga statistiken visar, dvs samma avverkningsvolym som i dagens skogsbruk. Detta innebär att när åtgärden leder till ett mindre intensivt skogsbruk på några delar av skogsmarken ökar det simulerade virkesuttaget i andra delar av landet, så att samma avverkningsvolym som idag upprätthålls.

Enligt modellresultaten har åtgärden Avv90% potential att öka kolsänkan både på kort (30 år) och lång (80–100 år) sikt (-9,6 Mton CO₂/år fram till 2100). LÅF+ kan

¹ Begreppet ”selektiv avverkning” används i denna rapport för att beskriva skogskötselmetoder som innebär upprepade höggallringar som syftar till att främja naturlig förnygring och att skapa fullskiktade skogar och kan också användas i övergångsfas från enskiktad till fullskiktad skog.

också bidra till en ökad kolsänka (-7,5 Mton CO₂/år fram till 2100) enligt simuleringarna, och effekten är främst kopplad till att avverkningen tillfälligt minskar och delvis till att åldersklassfördelningen förändras från ungskog mot högre åldersklasser i framskrivningarna. LÅF+ innebär att avverkningsnivån enbart kan upprätthållas i Götaland, medan den tillfälligt behöver minskas i andra delar av landet. Enligt modellresultaten kommer Skydd+ inte att bidra till en ökad kolsänka i och med att den återstående virkesproduktionsmarken brukas mer intensivt för att upprätthålla dagens avverkningsvolym. Skydd+ leder till att den simulerade kolsänkan minskar med 1,3 Mton CO₂/år fram till 2100 när avverkningsvolymen förblir oförändrad.

Om avverkningen minskar i Sverige leder detta till ett minskat utbud av trävaror. Detta kan minska möjligheten till substitution, dvs att skogsprodukter ersätter andra material och bränslen som har en större klimatpåverkan. Det kan också leda till läckage, vilket innebär ökad avverkning och därmed minskad kolsänka i andra länder. Varken läckageeffekter eller substitution ingår i resultaten i denna rapport, eftersom rapporten är fokuserad på kolsänkor i svenska skogar. En minskad avverkning leder också till att svenska skogar i genomsnitt blir äldre vilket kan innebära högre risk för skador och därmed utsläpp av växthusgaser. Klimatanpassning kommer att spela en viktig roll för att minska risken för skador, men dess effekt inkluderas inte i analysen.

Andra åtgärder som kan ha en mer långsiktig positiv effekt på kolsänkan enligt modellresultaten är Vsk-, samt i mindre grad, GS+ (-5,3 respektive -2,1 Mton CO₂/år fram till 2100). Ytterligare analys skulle dock behövas för att utreda hur viltskador kan minskas i praktiken i olika delar av landet och hur de genomförda åtgärderna skulle påverka skogens kolsänka. Kvävegödning har begränsad effekt på kolsänkan enligt modellresultaten, och kan förväntas leda till konflikter med andra ekosystemtjänster (t.ex. vattenkvalitet och bete för renar) vilket kan begränsa möjligheten att använda åtgärden och därmed dess potential att öka kolsänkan.

Modellanalyserna tyder på att Löv+ kan leda till att kolsänkan minskar med 6,2 Mton CO₂/år fram till 2100 på grund av lägre tillväxt i björkskogar. Ytterligare analyser bör dock genomföras av den positiva effekten som en ökad andel lövträd kan ha på risken för skador², och av effekten som andra lövträd skulle kunna ha på kolsänkan.

Modellresultaten tyder på att HF+ inte påverkar kolsänkan i skogen och träprodukter i någon större omfattning jämfört med dagens skogsbruk. Modelleringen av HF+ kompliceras av osäkerheter i inväxningsmodeller och urval av ytor för dessa metoder i simuleringarna. Resultaten om HF+ bör därför tolkas med försiktighet och fortsatt metodutveckling och ytterligare analys krävs i denna del.

Resultaten indikerar att olika åtgärder kan vara mer eller mindre effektiva i olika delar av landet. Att identifiera regionala strategier som kombinerar olika åtgärder kan därför bli avgörande för att öka kolsänkan på ett effektivt sätt.

² Begreppet skador används i denna rapport för att beskriva skador från stormar, skogsbränder insekter och svamp. Andra skador som körskador eller betesskador inkluderas inte.

Samtliga simuleringar indikerar att svenska skogar och träprodukter kommer fortsätta att vara kolsänkor under de kommande 100 åren, men sänkan kommer att minska över tiden oavsett vilken åtgärd genomförs. En allmän osäkerhet är hur tillväxten i skogen kommer att påverkas av ett framtida förändrat klimat. Data från Riksskogstaxeringen indikerar att tillväxten minskat de senaste åren, sannolikt framför allt på grund av ökad torra sommartid. Om torra blir mer frekvent på grund av klimatförändringar finns det en risk att modellresultaten i den här rapporten överskattar kolsänkan över tiden, alltså att kolsänkan i svenska skogar kan avta snabbare över tid än resultaten i rapporten indikerar. Därför blir det ännu viktigare att identifiera åtgärder som kan bevara eller öka kolsänkan i skogen och träprodukter för att uppnå klimatmålen.

När det gäller jämförelsen mellan olika åtgärder i rapporten, används samma scenario för klimatpåverkan och frekvens av skador för alla åtgärder. I praktiken påverkas frekvensen av skadeangrepp sannolikt av vilken av åtgärderna som genomförs, och denna effekt är alltså inte inkluderad här.

Summary

This report aims to describe the effect of selected forestry measures on the forest carbon balance, compared to current forest management. The results are based on model simulations done by SLU in the decision support system Heureka RegVis within the project “Forest impact assessment – SKA 22”. The analysed measures in this report are among the measures included in the forest management scenarios in SKA 22 and that were identified as measures that have a potential to affect the forest carbon sink. The report includes a quantitative analysis of the effects of the measures on forest growth, growing stock, felling and natural mortality as well as on carbon stocks and fluxes in different carbon pools, including harvest wood products. The effect of the measures on soil carbon was excluded in the report because of uncertainties in model simulations of soil carbon.

The results are confined to the effects on the carbon sink in Swedish forests and do not include leakage or substitution effects. Only a qualitative discussion on those effects is included.

The measures which were separately analysed are:

- Reduce browsing damage in young forests from 12 to 5 percent (Vsk-)
- Longer rotation periods by increasing the youngest age for final felling by 30 percent (LÅF+)
- Three-fold increase of area which is regenerated with birch compared to current practice (Löv+)
- A quarter of productive forest area is managed with continuous cover forestry (patch cutting and selective cutting) compared with 4 percent today (HF+)
- Forest area fertilized with nitrogen is 4.5 times larger than today (GS+)
- Set-aside forest area is twice as large as today (Skydd+)
- Felling is reduced by 10 percent compared to today’s level (Avv90%)

Except for model simulations in Avv90%, the volume of felling was constrained to the same level as reported in recent statistics, i.e. to the same felling intensity as in the business-as-usual scenario. This implies that, if a measure leads to a less intensive forest management in some forest areas, felling increases in other parts of the country to maintain the same felled volume as today.

According to model results, the measure Avv90% can potentially increase the carbon sink both in the short (30 years) and long term (80-100 years) (-9.6 Mton CO₂/y until 2100). LÅF+ can also contribute to an increased carbon sink (-7.5 Mton CO₂/y until 2100), according to simulations. This effect is mainly linked to a temporary reduced felling and partially to a change in age-class distribution in model projections. LÅF+ indicates that the felling only can be maintained in

Götaland (southern Sweden), while it needs to be temporarily reduced in other parts of the country. According to model results, Skydd+ will not contribute to an increased carbon sink when the remaining productive forestland is managed more intensively to maintain the current felled volume. Skydd+ reduces the simulated carbon sink by 1.3 Mton CO₂/y until 2100 when the felled volume remains unchanged.

A reduced felling in Sweden leads to a reduced supply of wood products. This can reduce the possibility of substitution, i.e. that forest products substitute other materials and fuels with a higher climate impact. It can also lead to leakage which implies increased felling and lower carbon sink in other countries. Neither leakage effects nor substitution are included in the results of this report because the report focuses on carbon sink in Swedish forests. A reduced felling also leads to Swedish forests being on average older which can imply a higher risk for damage from natural disturbances and thereby release of greenhouse gases. Climate adaptation will play an important role to reduce the risk for damage, but its effect is not included in the analysis.

Other measures that can have a more long-term positive effect on the carbon sink according to model results is Vsk- and, to a lesser extent, GS+ (-5.3 and -2.1 Mton CO₂/y until 2100, respectively). Further analysis would be needed to investigate in which way browsing damage can be reduced in practice in different part of the country and how the implemented measures would affect the forest carbon sink.

Nitrogen fertilization has a limited effect on the carbon sink according to model results and it can be expected to lead to conflicts with other ecosystem services (for ex. water quality and pasture for reindeer) which can constrain the possibility to implement this measure and thereby its potential to increase the carbon sink.

The model analysis indicates that Löv+ can reduce the carbon sink by 6.2 Mton CO₂/y until 2100 due to a lower tree growth in birch forests. However, further analysis should be carried out on the positive effect that more broadleaves could have on the risk for damage from natural disturbances and on the effect that other broadleaves species than birch could have on the carbon sink.

Model results suggest that HF+ does not significantly affect the carbon sink in the forest and harvest wood products as compared to current forest management. The simulation of HF+ is uncertain regarding the modelling of ingrowth and the choice of forest areas for this type of management in the simulations. The results on HF+ should therefore be interpreted with caution and further method development and analysis are required concerning this measure.

The results indicates that different measures can be more or less effective in different parts of the country. To identify strategies that combine different measures can therefore be crucial to increase the carbon sink in an effective way.

The simulations suggest that Swedish forests and harvest wood products will continue to be carbon sinks in the coming one hundred years, but the carbon sink will decrease over time regardless of which measure is implemented. A general uncertainty is how forest growth will be affected by a changing climate. Data from the Swedish Forest Inventory indicates that growth has decreased in the past years,

presumably because of summer drought. If droughts become more frequent due to climate change, there is a risk that model results in this report overestimate the carbon sink over time. That is, the carbon sink in Swedish forests can decrease faster than indicated by the results in this report. Therefore, it becomes even more important to identify measures that can preserve or increase the carbon sink in the forest and wood products to achieve current climate goals.

Concerning the comparison between different measures in this report, the climate effect and the frequency of natural disturbances is the same for all measures. In practice, the frequency of damage from natural disturbances is likely to be affected by management actions that are implemented, but this effect is not included here.

1 Inledning

1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att beskriva effekten på skogens kolbalans av utvalda skogliga åtgärder för ökad kolinlagring, i jämförelse med dagens skogsbruk. Resultaten förväntas bidra till ökad förståelse och kunskap om hur olika skogliga åtgärder påverkar kolinlagring och avgång av koldioxid i skogen.

För att uppnå syftet innehåller rapporten en kvantitativ analys av effekter på skogens tillväxt, virkesförråd, avverkning och naturlig avgång samt på kolförrådet i och kolflöden från olika kolpooler, inklusive träprodukter³. Analysen genomförs på nationell nivå samt på landsdelsnivå för att identifiera vilka åtgärder som kan ge ökad kolinlagring jämfört med dagens skogsbruk i olika delar av landet. Åtgärdernas effekter beaktas också i olika tidsperspektiv och synergier och konflikter med andra miljömål diskuteras. Rapporten innefattar också en beskrivning av risker för emissionsläckage när en åtgärd innebär en minskning av produktion av träråvaror och en kvalitativ beskrivning av påverkan på möjligheter till substitution.

Resultaten diskuteras i jämförelse med resultaten från publicerade vetenskapliga studier för att belysa osäkerhet kring effekterna av olika åtgärder samt om kunskapsbrister.

Resultaten är baserade på effektanalyser som togs fram inom projektet Skogliga Konsekvensanalyser 2022 (SKA 22) för att uppskatta effekter av enskilda åtgärder på skogsekosystemet, inklusive effekter på kolinlagring. Åtgärderna valdes bland de åtgärderna som innefattades inom SKA22-scenarierna.

Effektanalyserna inkluderar följande åtgärder:

- Minska viltskador
- Förlängd omloppstid
- Minskad avverkning
- Ökad andel björk
- Ökad användning av hyggesfritt skogsbruk (luckhugning och selektiv avverkning)
- Ökad gödsling
- Utökade naturvårdsavsättningar

³ Enligt IPCC:s metodriktlinjer, kapitel 12, definieras som träprodukter (harvest wood products – HWP) allt som tas tillvara vid avverkning.

1.2 Avgränsningar

Resultaten baseras på modellsimuleringar som genomfördes av SLU i beslutsstödsystemet Heureka RegVis inom projektet SKA 22. Åtgärderna analyseras var för sig och det tas inte hänsyn till om de sker på delvis samma arealer. Syftet med rapporten var att analysera den potentiella effekten av åtgärder för ökad kolsänka i skogen, men de åtgärder som inkluderats ska inte uppfattas som Skogsstyrelsens förslag på vad som bör göras. En korrekt tolkning av resultaten borde ta hänsyn till att några åtgärder genomförs i mindre omfattning än andra, vilket kan påverka storleken av effekten som åtgärder ha på kolsänkan.

Modellsimuleringarna innefattar en uppskattning av förändringarna i träprodukters kolförråd, men innefattar inte en uppskattning av effekter på klimatnytta via substitution av fossilbaserade produkter eller avverkningen i andra länder (läckage).

Åtgärder på organogena jordar, som återvätning vilket kan leda till stor klimatnytta, inkluderades inte i analysen på grund att modellen Heureka RegVis har en begränsad förmåga att simulera kolbalansen i marken, särskilt i organogena jordar.

På grund av osäkerheten kring modellresultaten om markkolet exkluderades också effekterna av åtgärderna på markkolet från denna rapport. Heureka RegVis inkluderar funktionalitet för att simulera ett startvärde för markkolpoolen och förändring över tid. Tester visade dock att det simulerade startvärdet överskattas av modellen (Skogsstyrelsen, 2022b), vilket skapar osäkerhet kring förändringar över tid och därmed kring resultatens giltighet. Överskattning av de simulerade startvärden för markkolet bekräftades med ytterligare testanalyser till denna rapport. I SKA 22 grundades uppskattningar av markkolets förråd och förändringar på den historiska kolsänkan i marken från inventeringsdata som alternativ till det simulerade startvärdet. Denna metod innebär dock att kolsänkan blir oförändrad oavsett scenario och att effekter av olika åtgärder jämfört med dagens skogsbruk därför inte kan uppskattas. Därför var metoden som användes i SKA 22 inte lämplig för analyser i denna rapport som syftar till att jämföra effekter av olika åtgärder. Denna rapport innefattar dock en diskussion om åtgärdernas effekter på markkolet som baseras på tidigare publicerade studier.

En ytterligare avgränsning gäller resultat om ökad användning av hyggesfritt skogsbruk som i Heureka RegVis simuleras genom selektiv avverkning och luckhuggning. Testanalyser indikerar att den simulerade tillväxten under selektiv avverkning brukar minska kraftigt efter några höggallringar⁴ i simuleringen och denna minskning verkar inte vara jämförbar med den förväntade tillväxten i verkligheten under liknande förhållanden (Skogsstyrelsen, 2022b). Effekter av olika hyggesfria metoder på skogsekosystemet kunde inte delas upp och därför bör resultaten vad gäller effekten av ökad användning av hyggesfritt på lång sikt betraktas som osäkra.

⁴ Avverkning där man glesar ut skogen genom att ta bort de största träden. Vid höggallring är medeldiametern på de uttagna träden större än medeldiametern i det kvarvarande beståndet (källa: www.sogskunskap.se)

Resultat från improduktiv skogsmark är också exkluderade från analysen eftersom inga ändringar simuleras i skogens tillväxt och andra undersökta variabler i improduktiv skogsmark när olika åtgärder genomförs.

Diskussionen om synergier och konflikter med andra ekosystemtjänster och biologisk mångfald berör utvalda ekosystemtjänster och exkluderar effekter på kulturmiljöer och kulturarv.

I denna rapport diskuteras inte heller vilka styrmedel som skulle kunna främja genomförandet av åtgärderna. Förslag för styrmedel för att hantera hinder för att åstadkomma åtgärder för ökade kolsänkor i skogs- och jordbrukssektorn presenterades dock i en tidigare rapport som togs fram av Naturvårdsverket, Skogsstyrelsen och Jordbruksverket (NV m.fl., 2022).

1.3 Klimatmål

FN:s klimatkonvention antogs 1992 och syftar till att stabilisera atmosfärens koncentration av växthusgaser på en nivå som förhindrar farlig mänsklig störning i klimatsystemet. Med Parisavtalet som trädde i kraft 2016 förband sig länderna att hålla den globala uppvärmningen väl under 2°C jämfört med förindustriella nivåer och sträva efter att begränsa den till 1,5°C jämfört med förindustriella nivåer. 2017 antog Sverige ett klimatpolitiskt ramverk och Europeiska unionen antog en ny klimatlag i april 2021.

Med klimatlagen har EU förbundit sig att uppnå klimatneutralitet senast 2050 och att minska nettoutsläppen med minst 55 procent till 2030 jämfört med 1990. I mars 2023 antog Europeiska rådet en förordning för att sätta ett mål till år 2030 inom sektorn för markanvändning, förändrad markanvändning och skogsbruk, den så kallade LULUCF-sektorn. Målet innebär ett nettoupptag inom LULUCF-sektorn på 310 miljoner ton koldioxidekvivalenter (Mton CO_{2e}) på EU-nivå, vilket är cirka 15 procent högre än idag. För Sverige innebär det att upptaget ska öka med 4 Mton CO_{2e} till år 2030 jämfört med genomsnittet för åren 2016–2018.

Sverige har som mål att senast år 2045 inte ha några nettoutsläpp av växthusgaser till atmosfären, för att därefter uppnå negativa utsläpp. Utsläppen från svenskt territorium ska vara minst 85 procent lägre år 2045 jämfört med 1990. De kvarvarande 15 procent utsläpp ned till noll kan uppnås genom kompletterande åtgärder som också innefattar upptag av koldioxid inom LULUCF-sektorn. Jämfört med EU-målen innebär de svenska målen alltså inte ett specifikt siffersatt mål inom LULUCF-sektorn. Ytterligare insatser krävs för att uppnå det nya EU-målet till år 2030 och för att kompensera de utsläpp som kvarstår vid år 2045.

1.4 Samspel med andra miljömål

Skogen levererar åtskilliga ekosystemtjänster (Hassan m.fl., 2005) och den kan därför bidra till att uppnå flera miljömål eller hållbarhetsmål som till exempel de Globala målen ”Ekosystem och biologisk mångfald”, ”Bekämpa klimatförändringar” och ”God hälsa och välbefinnande”. Skogens förmåga att samtidigt fylla flera funktioner utgör en nyckelresurs för ett samhälle som strävar efter att minska sin påverkan på miljön samt att främja välfärd för alla.

Relationerna mellan olika ekosystemtjänster samt biologisk mångfald är dock inte alltid positiva eller linjära (Biber m.fl., 2020; Jopke m.fl., 2015). Detta innebär att åtgärder som är optimala för att uppnå ett mål förmodligen inte är optimala för att samtidigt uppnå flera mål. För att åstadkomma större nytta och minska kostnader för samhället är det därför viktigt att ta hänsyn till synergier och konflikter som utvalda åtgärder kan leda till och uppmuntra lösningar som gör att en balans nås mellan olika mål.

I detta avsnitt diskuteras effekter av utvalda skogsskötselstrategier på några ekosystemtjänster baserat på Skogsstyrelsens rapport 2022/15 ”Översikt av åtgärder för ökad kolsänka i skogen” och ett urval av vetenskapliga studier. I Tabell 1 ges en kvalitativ översikt av dessa effekter. Analysen bör betraktas som ett försök att diskutera vilka strategier för en ökad kolsänka som kan innebära lägre risk för negativ påverkan på andra ekosystemtjänster och därmed som ett kunskapsunderlag för att identifiera effektiva åtgärder för att klimatmål ska uppnås samtidigt med andra miljömål.

Tabell 1 – Översikt av effekter av skogsskötselstrategier på olika ekosystemtjänster. Rött: negativ effekt; orange: trolig negativ effekt; blå: ingen effekt; ljusgrönt: trolig positiv effekt; mörkgrönt: positiv effekt; grått: okänd/oklar effekt.

Åtgärd	Ekosystemtjänster					Biologisk mångfald
	Träråvaror	Kolsänka i skogen	Rekreation	Bete för renar	Vattenkvalitet	
Minskade viltskador						
Förlängd omloppstid						
Ökad andel lövträd						
Hyggesfritt (selektiv avverkning)						
Gödsling						
Ökade naturvårdavsättningar						
Minskad avverkning						

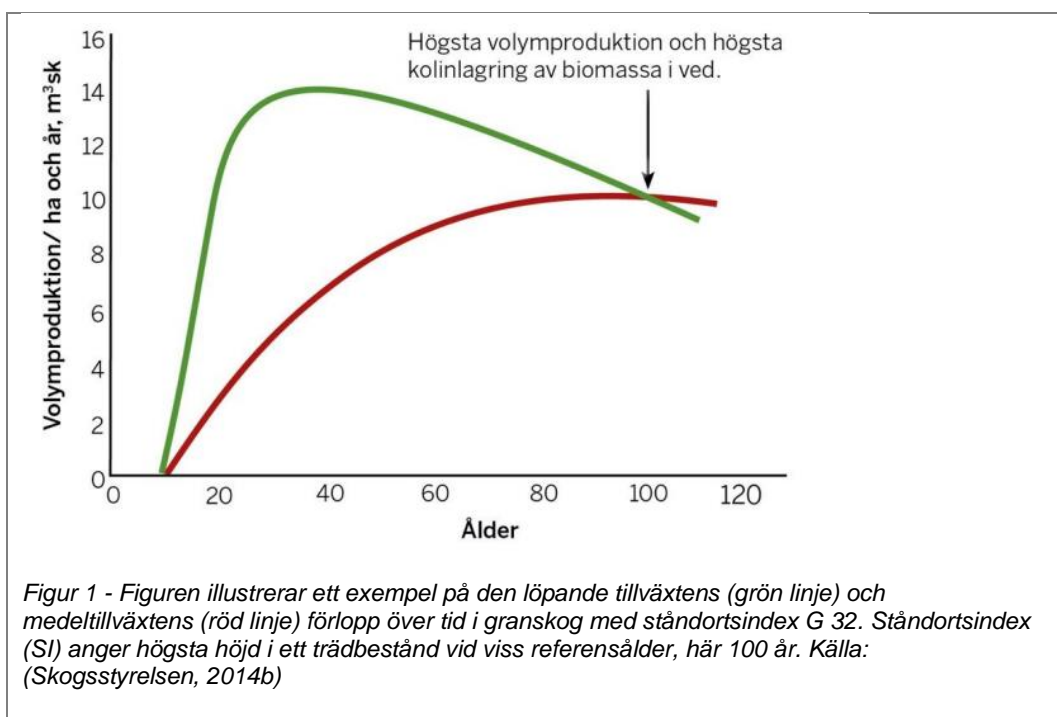
En översiktsstudie om effekten av viltskador på skogsekosystemen anger att viltskador kan ha en negativ effekt på skogstillväxten (Gill, 1992) som kan leda till negativa effekter på produktion av träråvaror och kolsänkan i skogen. Däremot kan positiva effekter på skogstillväxten, på produktion av träråvaror och på kolsänkan förväntas om viltskador minskas. Viltskador kan också påverka andra ekosystemtjänster och biologisk mångfald. Högt betestryck kan leda till mer artfattiga skogar (Reed m.fl., 2022) och därför kan mindre viltskador gynna den biologiska mångfalden. Samtidigt kan viltbete ha positiva effekter på biologisk mångfald eftersom det kan leda till ökad heterogenitet på beståndsnivå (Edenius m.fl., 2002). Möjligtvis kan konflikter med jakt och därmed rekreation uppstå när stammen av klövvilt minskas för att minska viltskador (Sjölander-Lindqvist och Sandström 2019). Däremot antas minskade viltskador kunna gynna lövträd som kan ha positiva effekter på rekreation, vattenkvalitet samt biologisk mångfald. En ökad

andel lövträd nära vattendrag, till exempel, kan ha positiv effekt på vattenkvalitet och akvatisk fauna (Maher Hasselquist m.fl., 2021) och troligtvis på fiske och rekreation. Dessutom kan minskade viltskador indirekt påverka ekosystemtjänster genom att öka andelen tall i skogen vilket kan ha positiva effekter på biologisk mångfald, rekreation och motståndskraft mot skador, som i sin tur kan positivt påverka produktionen av träråvaror och kolsänkan i skogen (Felton m.fl., 2020). Omfattande analyser om effekter av viltskador på lavförekomst och därmed bete för renar saknas.

Förlängd omloppstid kan leda till ökad kolsänka i skogen, men också till minskad produktion av träråvaror beroende på i vilken utsträckning omloppstiden förlängs (Kaipainen m.fl., 2004; T. Lundmark m.fl., 2018; Roberge m.fl., 2016) (Box 1). När produktionen av träråvaror minskas leder detta till att möjligheten till substitution minskar, men den totala klimatnyttan verkar ändå vara positiv (T. Lundmark m.fl., 2018). Förlängda omloppstider kan ha positiv effekt på biologisk mångfald på grund att livsmiljöer som är viktiga för flera arter, såsom att antalet äldre och stora träd ökar (Roberge m.fl., 2016). Däremot ser förhållandet mellan biologisk mångfald och beståndsålder ut att variera i studier beroende på vilken indikator och därmed art som väljs för att undersöka sambandet (Coote m.fl., 2013; Saraev m.fl., 2019). I Roberge m.fl. (2016) sammanfattas också effekterna på indikatorer för rekreation, bete för renar och vattenkvalitet. Förlängda omloppstider kan leda till en ökad areal äldre skog samt mindre kalhyggen på landskapsnivå vilket kan ha en positiv effekt på rekreation. Positiva effekter på lavförekomst och därmed bete för renar kan förväntas bara när omloppstiden förlängs betydligt samtidigt som gallring anpassas därefter. Negativa effekter på vattenkvalitet som kopplas till kalavverkning, inklusive effekter på ras och erosion, minskar när omloppstiden förlängs (Shah m.fl., 2022) och därför kan positiva effekter på vattenkvalitet förväntas.

Box 1 - Omloppstiden i svenska skogar

För trakthyggesbruk är omloppstiden av stor betydelse för volymproduktionen, men även för andra värden i skogen. För att maximera volymproduktionen ska bestånden slutavverkas då medeltillväxten kulminerar. Tidpunkt för slutavverkning regleras i Skogsvårdslagen (1979:429) där lägsta ålder för slutavverkning (LÅF) anges beroende på skogen bördighet (ståndortsindex). Tidpunkt för LÅF är reglerad för att ge skydd för den yngre skogen och samtidigt ge handlingsfrihet för markägare att bestämma avverkningstidpunkt utifrån målen med skogsskötseln. Medeltillväxten vid LÅF är 80–90 procent av maximal medelproduktion och är 10–40 år tidigare än tidpunkt för maximal medelproduktion. Det innebär att om bestånd vanligtvis avverkas vid LÅF så skulle volymproduktionen kunna öka ännu mer om omloppstiderna förlängs. Vilken effekt en generellt förlängd omloppstid kan leda till på regional och nationell nivå beror även på skogens åldersfördelning vid den studerade tidpunkten, det vill säga att om det finns stora volymer av skog som är äldre än den satta slutavverkningsåldern så kommer avverkningsmöjligheterna inte att påverkas. Om däremot LÅF skulle höjas i Skogsvårdslagen och det samtidigt inte finns bestånd tillgängliga, eller finns få bestånd för slutavverkning, medför detta begränsningar av avverkningsmöjligheterna.



Effekterna av ökad andel lövträd kan variera betydligt beroende på flera faktorer som bland annat trädslag och region samt om man ökar inblandning med andra trädslag eller om det skapas ren lövskog. Tillväxten varierar mycket bland olika lövträd (Rytter, 2019) och därmed produktionen av träråvaror och kolinlagringen. Inblandning av björk i granskogar har positiv effekt på rekreation, vattenkvalitet och biologisk mångfald, men effekter på produktion och kolsänka är osäkra (Felton m.fl. 2016; Pukkala 2018). En finsk studie baserad på modellsimulering över 150 år indikerar att skogsbruk som syftar att öka andel björk i skogen leder till högre naturskönhet och högre biodiversitet men lägre produktion av träråvaror och kolinlagring än skogsbruk som främja barrskogar (Pukkala, 2018). Samtidigt kan en ökad andel lövträd bidra till en ökad variation i skogslandskapet och därmed minska risken för biomassförlust och utsläpp kopplade till skador (Jactel m.fl., 2017).

Hyggesfritt skogsbruk är ett samlingsbegrepp för flera olika skogsskötselmetoder som kan påverka skogsekosystemen på olika sätt. Enligt definitionen som togs fram av Skogsstyrelsen innebär hyggesfritt skogsbruk att skogen sköts så att marken alltid är trädbevuxen utan att det uppstår kalhuggna ytor större än 0,25 hektar och omfattar bländningsbruk samt överhållen skärm och luckhuggning (Skogsstyrelsen, 2021). Därför kan effekter av hyggesfritt skogsbruk på olika ekosystemtjänster och biologisk mångfald variera på grund av att det i praktiken kan implementeras på olika sätt. De flesta publicerade vetenskapliga studier som analyserar effekter av hyggesfritt skogsbruk på olika ekosystemtjänster och biologisk mångfald fokuserar på metoder som innebär upprepade gallringar som syftar till att skapa fullskiktade skogar, dvs olika former av selektiv avverkning, medan kunskapen om effekter av andra hyggesfria metoder verkar vara väldigt begränsad. Därför diskuteras i detta avsnitt bara effekter av selektiv avverkning på olika ekosystemtjänster och biologisk mångfald. Vetenskapliga studier baserade på modellsimulering tyder på att en ökad användning av selektiv avverkning kan bidra till att öka skogens

multifunktionalitet i nordiska skogar (Eyvindson m.fl., 2021; Peura m.fl., 2018; Zanchi & Brady, 2019). Flera studier anger att selektiv avverkning kan bidra till att diversifiera det skogliga landskapet och därmed ha positiva effekter på biologisk mångfald (Ekholm m.fl., 2022; Sténs m.fl., 2019). Selektiv avverkning kan också leda till att skogar blir mindre täta och därmed ha positiv effekt på lavflora och bete för renar (Korosuo m.fl., 2014). Selektiv avverkning kan öka skogens rekreativvärde och anses som ett bra alternativ för att sköta tätortsnära skogar (Hertog m.fl., 2022; Vitkova & Ní Dhubbáin, 2013). Selektiv avverkning minskar negativa effekter på vattenkvalitet som kopplas till kalhyggen inklusive en minskad risk för ras och erosion samt kan bidra till att reglera grundvattennivån på torvmarker som alternativ till dikesrensning (Laudon & Maher Hasselquist, 2023; Reynolds, 2004). Om selektiv avverkning har en positiv eller negativ effekt på kolbalansen jämfört med trakthyggesbruk är osäkert eftersom olika effekter bör beaktas samtidigt. Blädningsbruk verkar leda till en tillväxt som är 10–20 procent lägre än den potentiella tillväxten i trakthyggesbruk och därmed till en lägre kolinlagring, men effekten kan påverkas av lokala förutsättningar (Skogsstyrelsen, 2014a). Samtidigt antyder forskningsstudier att selektiv avverkning har potential att undvika utsläpp av växthusgaser från marken kopplat till kalhyggen (Lindroth m.fl., 2018) samt att minska risken för skador och utsläpp kopplat till dem genom att skapa mer varierade skogsbestånd och skogslandskap (Potterf m.fl., 2022). Däremot är kunskapen om skogen motståndskraft mot skador på beståndsnivå kopplat till selektiv avverkning bristande (Mason m.fl., 2022) Effekten på kolförrådet i träprodukter är också osäker eftersom selektiv avverkning kan leda till lägre produktion av träråvaror men också till olika typ av sortiment, vilket kan påverka livslängden av träprodukterna (Pukkala, 2014).

Kvävegödsling är en åtgärd som kan öka skogens tillväxt där skogen är kvävebegränsad (Aber m.fl., 1989). Den positiva effekten på tillväxten i kvävebegränsade skogar kan leda till positiva effekter på produktionen av träråvaror och på inlagring av kol i skogsekosystemet. Samtidigt kan kvävegödsling ha negativa effekter på andra ekosystemtjänster. I Sverige finns en stark geografisk gradient i kvävenedfall som ökar från nordöstra till sydvästra Sverige (Karlsson m.fl., 2022) som påverkar kvävetillgång och som kan leda till en begränsad effekt av kvävegödsling på skogens tillväxt och högre risk för kväveläckage i södra Sverige (Akselsson m.fl., 2010; Hedwall m.fl., 2013). Skogsstyrelsens allmänna råd till 7 kap. 26 § innebär att gödsling inte bör utföras i Götaland⁵ för att förhindra eller begränsa negativa effekter som kvävegödsling kan leda till. Kvävegödsling leder till ökat kväveläckage och därmed försämrade vattenkvalitet (Shah m.fl. 2022) samt kan leda till vegetationsförändringar mot mer kvävegynnande arter, vilket innebär att bland annat lavar och mossor, och därmed bete för renar, påverkas negativt (Sandström m.fl. 2016). Därför anger Skogsstyrelsens allmänna råd till 7 kap. 26 § att gödsling inte bör ske på lavmarker. Samlad kunskap om effekten av gödsling på rekreation saknas, men det kan förväntas att frodig och hindrande undervegetation i gödslade bestånd kan påverka rekreativvärdet negativt (Larsson m.fl., 2009). En översyn av studier om effekten av kvävegödsling på biologisk mångfald drar slutsatsen att gödsling kan leda till förändringar av flora

⁵ med undantag av granskogar där grenar och toppar, inklusive barr, skördats eller planeras att skördas inom område 2 (norra Götaland)

och fauna och kan påverka en del arter negativt men effekten kan variera i olika artgrupper (Sullivan och Sullivan 2018).

En ökning av naturvårdsavsättningar syftar främst att bevara eller öka den biologiska mångfalden men kan samtidigt leda till synergier och konflikter med olika ekosystemtjänster (Biber m.fl., 2020; Eggers m.fl., 2020; Mazziotta m.fl., 2022). När produktiv skogsmark avsätts kan produktionen av träråvaror minska eller avverkning flyttas till andra delar av landet eller till andra länder (Schier m.fl., 2022; Skogsstyrelsen, 2022a). Flera studier antyder att ökat skydd av skog leder till en ökad kolinlagring i skogsekosystemet på kort och medellång sikt men samtidigt kommer ökat skydd av skog att påverka möjligheter till substitution och kolinlagring i träprodukter och därmed klimatnyttan på lång sikt (Gustavsson m.fl., 2017; Petersson m.fl., 2022; Taeroe m.fl., 2017). Skyddad skog har även högt rekreativvärde (Balmford m.fl., 2015) och den har en viktig roll för att bevara resurser för rennäring (Kivinen, 2015). Samtidigt bör planering av formellt skyddad skog ta hänsyn till intressenternas perspektiv för att undvika konflikter kopplade till restriktioner eller ökad turism som kan påverka rennäring (Hovik m.fl., 2010). Bevarandet av skog leder också till positiva effekter på vattenkvalitet. Detta gäller särskilt kantzoner vid sjöar och vattendrag som fungerar som kemiska och fysiska filter för ämnen och sediment (Kuglerová m.fl., 2020; Sweeney & Newbold, 2014) och kan förhindra ras och slamströmmar i anslutning till vattendrag.

Olika åtgärder kan användas för att minska avverkningen på landskapsnivå. En minskad avverkning kan uppnås genom att avsätta skogsmark från produktion, förlänga omloppstider eller använda mindre intensiva skogsbruksmetoder såsom olika former av hyggesfritt skogsbruk. En negativ konsekvens av minskad avverkning är att inhemsk produktion av träråvaror minskar vilken kan leda till att en del avverkning flyttas till andra länder och till mindre möjlighet till substitution (R. Lundmark, 2022). Samtidigt leder minskad avverkning till ett högre biomassa-förråd och därmed ett högre kolförråd i skogen. Effekten på den totala klimatnyttan kan dock variera beroende på antaganden om substitutionseffekten, läckage och i vilket tidsperspektiv klimatnyttan uppskattas (Schulte m.fl., 2022; Soimakallio m.fl., 2021). Eftersom minskad avverkning kan implementeras på olika sätt på landskapsnivå, kan åtgärden troligtvis leda till positiva effekter på andra ekosystemtjänster om skogsskötselstrategier som främjar dessa positiva effekter prioriteras. Genom att, till exempel, avsätta skogar med höga naturvärden, gammal skog, kantzoner eller tätortsnära skogar samt bruka lavrika marker, kantzoner eller skogar med högt rekreativvärde med hyggesfria metoder kan minskad avverkning bland annat leda till positiva effekter på biologisk mångfald, rekreation, bete för renar samt vattenkvalitet. Beroende på vilken skog som avsätts och var den är belägen kan skogen även utgöra skydd mot effekterna av ett förändrat klimat (t.ex. skydd mot erosion och ras vid vägar och samhällen, brandskydd).

2 Metoder

2.1 Utvalda åtgärder

Inom projektet SKA 22 uppskattades effekter av olika skogsbruksscenarioer på skogsekosystemet, där varje scenario bestod av en kombination av olika åtgärder. I denna rapport presenteras i stället effektanalyser av enskilda åtgärder med utgångspunkt i SKA 22 scenariot Dagens skogsbruk. Ett urval av specifika åtgärder, som kan simuleras i Heureka RegVis gjordes för att ge ökad förståelse och kunskap om hur de olika åtgärderna påverkar kolinlagring och avgång av koldioxid i skogen. De utvalda åtgärderna bedömdes ha potential att påverka kolsänkan i skogen samtidigt som beräkningsförutsättningar fanns klara i och med att de använts inom de befintliga SKA-scenarierna. En sammanfattad beskrivning av de utvalda åtgärderna i jämförelse till dagens skogsbruk (BAU) ges i Tabell 2. En mer detaljerad beskrivning av åtgärderna ges i avsnittet 2.2.1 samt i Skogsstyrelsen (2022).

Tabell 2 - Beskrivning av åtgärder som analyseras i rapporten

Åtgärder	Akronym	Beskrivning
1. För att minska viltskador	Vsk-	Halvering av betesskador i ungskog: 5 procent jämfört med 12 procent i BAU
2. Förlängd omloppstid	LÅF+	Lägsta ålder för föryngringsavverkning är 30 procent högre än i nuvarande regelverk
3. Minskad avverkning	Avv90%	10 procent mindre avverkning än i BAU
4. Ökad andel björk	Löv+	30 procent av föryngrad areal med björk jämfört med 10 procent i BAU
5. Ökad användning av hyggesfritt	HF+	Ungefär en fjärdedel av virkesproduktionsmarken brukas med hyggesfria metoder (luckhuggning och selektiv avverkning) jämfört med 4 procent i BAU
6. Ökad kvävegödsling	GS+	150 000 ha/år skogsmark gödslas jämfört med 33 000 ha/år i BAU
7. Ökade naturvårdsavsättningar	Skydd+	Areal naturvårdavsättningar fördubblas: 22 procent av virkesproduktionsmarken jämfört med 11 procent i BAU.

2.2 Modellsimulering

Metoder som har använts för att simulera effekter av olika åtgärder på skogsekosystemet i Sverige beskrivs i detalj i Skogsstyrelsen (2022). Rapporten ger också en detaljerad beskrivning av brister och utvecklingsbehov avseende dataunderlag för dagens skogsbruk, modeller och funktionalitet i Heureka RegVis. I detta avsnitt presenteras en sammanfattning av dessa metoder.

2.2.1 Simulerat skogsbruk

Dagens skogsbruk och de olika utvalda åtgärderna som simuleras innebär olika inställningar avseende markanvändning och skötsel i modellkörningen. Förutom i åtgärden ”Minskad avverkning” eftersträvas i alla skogsbruksalternativ att på virkesproduktionsmarken avverka en volym som motsvarar avverkningsnivån i scenariot dagens skogsbruk. Tillfälliga minskningar i avverkad volym jämfört med dagens skogsbruk beror på att skogsarealen som har nått den lägsta avverkningsålder inte räcker för att upprätthålla avverkningsnivån. Däremot beror tillfälliga öknings i den simulerade avverkningen i åtgärden luckhuggning på att bara hälften av skogsyta avverkas i ett först steg och andra delen avverkas några år senare. Detta leder till en försenad avverkning jämfört med dagens skogsbruk.

Dagens skogsbruk (BAU)

I scenario BAU simuleras ett fortsatt brukande av skogen med dagens metoder och omfattning inklusive nuvarande avverkningsintensitet (i förhållande till tillväxt på virkesproduktionsmark) (Skogsstyrelsen, 2022b). Inställningarna för skogsskötseln i BAU baseras på statistik från Skogsstyrelsen och SLU, Riksskogstaxeringen. Använda data är den senast tillgängliga informationen 2020. Data innefattar information om arealer av skogsmark indelade i olika kategorier (virkesproduktionsmark, formellt skyddad skogsmark, frivilliga avsättningar, hänsynsytor, improduktiv skogsmark), arealer av trakthyggesbruk och hyggesfritt skogsbruk, avverkning, föryngring och gödsling.

Minskade viltskador (Vsk-)

I Heureka RegVis kan skadenivån justeras genom att ange en skadegrad som motsvarar en viss skadenivå på huvudstammarna i procent. Skadegrad 1 motsvarar situationen när data bakom ungskogsfunktionaliteten samlades in på 1970 och 1980-talen. I BAU har skadegraden satts till 5, vilket motsvarar en skadenivå på 12 procent färsk skador på huvudstammarna och i Vsk- halverades skadegraden till 2,2 som motsvarar 5 procent färsk skador (U. Nilsson m.fl., 2016; Skogsstyrelsen, 2019).

Förlängd omloppstid (LÅF+)

I LÅF+ höjs lägsta ålder för föryngringsavverkning med 30 procent jämfört med BAU. I BAU används Skogsvårdslagens regelverk om lägsta ålder för föryngringsavverkning som en restriktion för när föryngringsavverkning får ske.

Minskad avverkning (Avv90%)

I Avv90% minskas avverkning med 10 procent jämfört med BAU. I BAU eftersträvas att behålla samma avverkningsintensitet per beräkningsområde som den senast tillgängliga statistiken visar. Denna utgår från perioden 2016–2020 och motsvarar 79 procent av nettotillväxten (bruttotillväxt-naturlig avgång) på

virkesproduktionsmark. Avverkningen avser levande träd exklusive röjning. Motsvarande avverkningsintensitet regionalt i BAU är: Fjällnära 39 procent, N Norrland 62 procent, S Norrland 66 procent, Svealand 92 procent, Götaland 89 procent.

Ökad andel björk (Löv+)

Föryngringsmetoden ändras i Löv+ för att öka andel skogsmark som föryngras med björk. I Löv+ eftersträvas att lövträd (främst björk) utgör minst 30 procent av grundytan jämfört med 10 procent i BAU.

Mer hyggesfritt (HF+)

Hyggesfritt skogsbruk simulerades genom selektiv avverkning och luckhuggning, men innefattar inte varianten av hyggesfritt som innebär en överhållen skärm. Därmed täcktes två av de varianter som ingår i Skogsstyrelsens definition av hyggesfritt skogsbruk (Skogsstyrelsen, 2021) (Figur 2). Luckhuggning tillämpas i talldominerad skog och implementeras i Heureka RegVis genom att dela en yta i två delar. Avverkningen i den första delen kan ske om skogen är äldre än LÅF. Efter att den första delen har slutavverkats måste den nya skogen i denna yta ha nått en höjd på minst 2,5 m innan den andra delen av ytan får avverkas. Selektiv avverkning tillämpas i grandominerad skog och simuleras som en serie av höggallringar, med minst 20 år emellan. Det finns ingen restriktion avseende ålder när den första gallringen kan genomföras. Arealen hyggesfritt fördelas jämnt mellan metoderna selektiv avverkning och luckhuggning. I HF+ brukas ungefär en fjärdedel av virkesproduktionsmarken (5 Mha) med hyggesfria metoder jämfört med 4 procent (0,67 Mha) i BAU.



Figur 2 – Varianter av hyggesfritt skogsbruk som simuleras i Heureka RegVis modellen: luckhuggning (till vänster) som innebär att man aktivt skapar luckor med 20–50 meters diameter i beståndet; selektiv avverkning innebär att skogen sköts med upprepade höggallringar som syftar till att skapa en fullskiktad skog (till höger) (Foto: Leif Milling, Johan Nitare).

Ökad gödsling (GS+)

Åtgärden GS+ innebär att arealen skogsmark som gödslas med kväve ökar jämfört med BAU. Omfattningen av gödsling ökas från 33 100 ha/år i BAU till 150 000 ha/år i GS+. Omfattningen i BAU baseras på medelvärdet för perioden 2016–2020

inhämtat via Skogsstyrelsens åtgärdsundersökning⁶. Fördelningen av arealen per landsdel är samma som i SKA 15 (Skogsstyrelsen, 2015c) eftersom statistiska data på regionalnivå inte finns. I Norra Norrland ökas den gödslade arealen från 7 100 till 53 600 ha/år, i Södra Norrland från 15 300 till 69 400 ha/år, i Svealand från 10 100 till 23 000 ha/år och i Götaland från 600 till 2 700 ha/år. Fördelningen per landsdel ändras jämfört med BAU genom att öka den gödslade arealen främst i Norrland (83 procent av gödslad areal) eftersom gödsling i södra Sverige bör undvikas enligt allmänna råd till 7 kap. 26 §. I Heureka RegVis uppskattas effekten av kvävegödsling som en höjning i tillväxten genom prognosfunktioner som är framtagna på ett stort antal gödslingsförsök (Pettersson, 1994a, 1994b). Prognosfunktionerna uppskattar gödslingseffekt baserad på variabler som ståndortsindex, breddgrad, höjd över havet, löpande tillväxt, dominerande trädslag, gödselmedel (urea eller ammoniumnitrat) och gödselgiva. I de framskrivningar som togs fram i effektanalyserna finns det ingen restriktion om att inte gödsla på lavrik eller lavmark. Detta innebär att analysen inte följer Skogsstyrelsens allmänna råd till 7 kap. 26 §, som anger att gödsling inte bör utföras på lavmarker.

Ökade naturvårdsavsättningar (Skydd+)

I Skydd+ ökas arealen av skyddad produktiv skogsmark till 5,2 miljoner hektar jämfört med 2,6 miljoner hektar i BAU vilket då minskar arealen virkesproduktionsmark i samma omfattning. Dessa ökade naturvårdsavsättningar har i SKA 22 gjorts utifrån en modell som styr både mot en given målareal och mot en prioritering av egenskaper. För denna modell är Sverige indelat i fem naturgeografiska regioner: alpin, nordvästlig boreal, sydostlig boreal, sydlig boreal samt kontinental. I varje region nedanför den alpina regionen utökas den totala arealen naturvårdsavsättningar till 20 procent av den produktiva skogsmarken. Nya naturvårdsavsättningar väljs enligt ett antal grundprinciper som syftar till att välja ut skogsområden med konstaterade eller sannolika höga naturvärden. Denna princip används för att lägga till naturvårdsavsättningar upp till 80 procent av den nya naturvårdsavsättningsarealen inom varje av de fyra ovannämnda regionerna. Sedan fylls resterande 20 procent genom att slumpmässigt välja provytor på produktiv skogsmark för att spegla det faktum att vissa arealer utvecklings- och arronderingsmark brukar tas med i det praktiska bildandet av skyddade områden.

2.2.2 Heureka RegVis

För att beräkna skogens utveckling används Heureka-applikationen RegVis (Wikström m.fl., 2011) som i första hand är avsett för analys av olika skogliga skötselstrategier på regional nivå. Systemet är uppbyggt av en mängd simuleringsmodeller för framskrivning av skogens tillstånd samt modeller som beskriver skogsvårdsaktiviteter och avverkningar.

De enskilda provytorna i Riksskogstaxeringen 2016–2020 används som åtgärdsenheter i Heureka RegVis. Som beräkningsenhet i framskrivningen av skogen (tillväxt, höjd, ålder, diameter, med mera) används en kombination av ytvisa och trädvisa modeller. De beräknings- och åtgärdsenheter som används i systemet möjliggör en detaljerad redovisning av resultat. Vid resultatredovisningen

⁶ <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/statistik-efter-amne/atgarder-i-skogsbruket/>

aggregeras ytvisa uppgifter till resultat för beräkningsområden och ägarkategorier som sedan i sin tur kan summeras.

Framskrivningarna som gjordes inom SKA 22 och effektanalyserna startar med året 2020 och slutar efter 100 år. Resultaten från beräkningarna för en femårsperiod utgörs av detaljerade uppgifter om skogstillstånd för varje period och om tillväxt, avverkningar och andra utförda åtgärder på provytorna under de olika femårsperioderna.

2.2.3 Klimatförändringar och risk för skador

Klimatförändringarna simuleras i Heureka RegVis framför allt genom sin påverkan på trädens tillväxt. I grunden finns empiriska tillväxtmodeller för enskilda träd och för hela provytor. Eftersom de modellerna är byggda på historiska data är de inte fullt ut tillämpbara vid framskrivning av ett förändrat klimat. Därför adderas en tillväxteffekt som beräknas med den processbaserade modellen BIOMASS (Bergh m.fl., 2003; McMurtrie m.fl., 1990). Tillväxteffekten beräknas för olika lokala förutsättningar och styrs av antaget klimatscenario och i vilken klimatmodellscenariot har körts. För modellsimuleringarna i BIOMASS används resultat baserat på:

- 1) RCP4,5: scenariot RCP4,5 från IPCC används som bas i samtliga åtgärder (Thomson m.fl., 2011). RCP står för "Representative Concentration Pathways", vilket översätts med strålningsdrivningsscenario, och är ett sätt att beskriva den förväntade strålningsdrivningen givet olika utvecklingsvägar för utsläpp och markanvändning. RCP4,5 är ett scenario som bygger på en ambitiös klimatpolitik där utsläppen av koldioxid visserligen ökar fram till 2040 för att därefter avta och som förväntas kunna hålla den globala uppvärmningen i nivå med 2 grader.
- 2) Klimatmodell MPI-ESM-LR: resultat från att ha kört klimatscenario RCP 4,5 i modell MPI-ESM-LR har använts för simuleringen i BIOMASS (Skogsstyrelsen, 2015a). Klimatmodellen MPI-ESM-LR (Giorgetta m.fl., 2013) är en av de nio klimatmodeller som SMHI använder i sina ensembler av klimatscenarier.

Den naturliga avgången beräknas i Heureka RegVis med hjälp av avgångsfunktioner. Avgången beräknas ytvis och sker i två steg, i ett första steg avgörs om det skett någon avgång på ytan, och i steg två beräknas andel av grundytan för överlevande träd på ytor där avgång skett.

Stormar beräknas av en stormmodul som repeterar en historisk tidsserie av stormar som anpassas till klimatförändringarna. Den historiska tidsserien för stormar baseras på statistiska data från 1953 till 2012. Uppgifter på länsnivå om hur stora volymer som fallit i stormarna har använts, där data från Riksskogstaxeringen om skogstillståndet det aktuella året använts för att anpassa en vindmodell för just den stormen. I vindmodellen ingår variabler som relaterar till beståndet (trädslagsblandning, höjd, utförd gallring, omgivande bestånds höjd, tjälad mark m. m.) (Lagergren m.fl., 2012). Det ingår också en kalibreringsfaktor (vindfaktorn), som anpassas så att modellen förutsäger lika många kubikmeter vindfällan som i historiskt data. Inom SKA 22 har tidsserien anpassats, eftersom klimatförändringar

förväntas leda till en minskning av antalet dagar med tjäle i marken, vilket ökar risken för stormskador. För klimatscenariot RCP4,5 beräknades den relativa minskningen i antalet frostdagar över tid och stormrisken har ökat i motsvarande grad. Detta innebär att antal stormar ökar över tiden i BAU och i samma omfattning i alla andra scenarierna. Däremot varierar volymen som påverkas vid varje storm i enskilda åtgärder jämfört med BAU på grund av att skogstillståndet skiljer sig.

Risk för granbarkborre uppskattas genom ett riskindex som beskriver den relativa känsligheten för ett bestånd att råka ut för granbarkborreangrepp baserat på beståndsegenskaper samt klimatvariabler (Nordkvist m.fl., 2023). Indexet är baserat på kunskap från empiriska studier, modeller, observationer och expertkunskap. Variablerna som ingår och påverkar indexvärdet är: temperatursumma, markfuktighet, stormfällningar, volym gran, volym björk, slutenhet, granens diameter och ytan åldersstruktur. På grund av att markfuktigheten inte påverkas av klimatscenariot, har förändrad nederbörd ingen effekt på risken för granbarkborre som inkluderas i framskrivningarna i denna rapport.

Risken för rotröteangrepp beräknas som antal granar som förväntas ha rotröta baserat på olika variabler (beståndsålder, ståndortsindex, temperatursumma, bröst diameter, markfuktighet samt textur, höjd över havet, longitud och andel gran) (Thor m.fl., 2005). Risken beräknas i Heureka RegVis också som total grundyta och volym av träd som angreps av rotröta

Andra risker för skador innefattas inte i simuleringar, t. ex. risken för skador från skogsbrand.

2.2.4 Kolbalansen

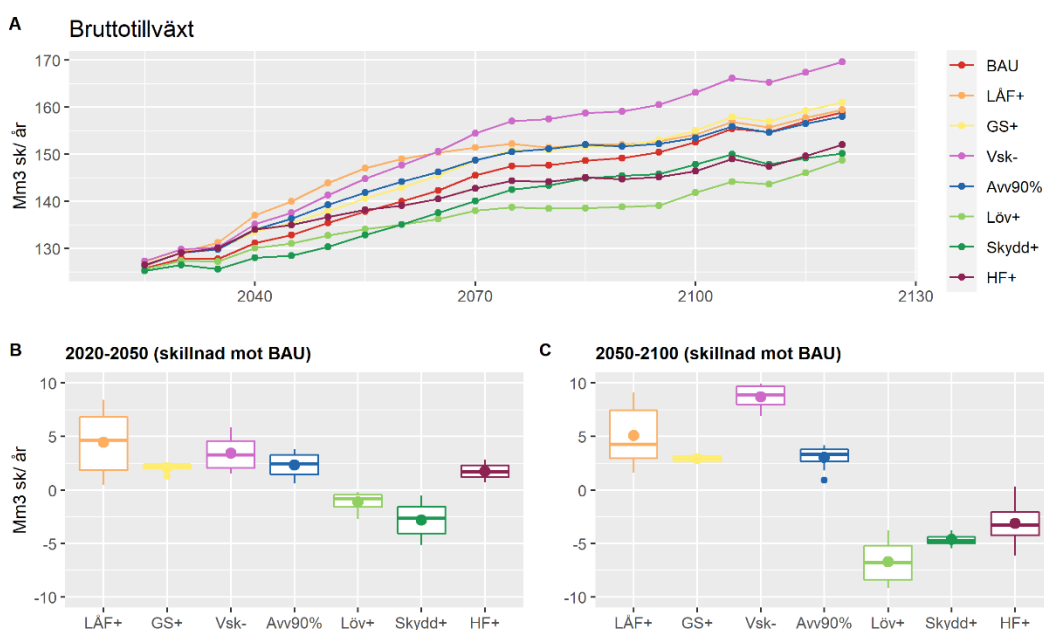
Med Heureka RegVis simuleras kolförråd som finns i träskikt, död ved, marken samt i produkter som avverkats. Förändringen av kolförrådet under en tidsperiod beror på bortförel genom avverkning, emission genom nedbrytning, samt upptag genom tillväxt. Kolförrådet i träskiktet beräknas med hjälp av biomassafunktioner för enskilda träd för att uppskatta trädbiomassan (Claesson m.fl., 2001; Marklund, 1988; Petersson, 1999; Petersson & Ståhl, 2006) samt omräkningstal från biomassa (torrsubstans) till kolmängd (Skogsstyrelsen, 2000). Kolförekomst i död ved beror på ingående mängd, tillförel från mortalitet och kvarlämnade avverkade träd och träddelar (t.ex. högstubbar), samt nedbrytning. Mängden död ved i början av simuleringsperiod baseras på data från Riksskogstaxeringen. Beräkningen av kolförråd i träprodukter (HWP) baseras på metoden i 2006 IPCC riktlinjerna (Pingoud m.fl., 2006; Wikberg, 2011). Förändringarna i träprodukters kolförråd uppskattas som skillnaden mellan det årliga inflödet och utflödet från träprodukter. Inflödet utgörs av produktion av halvfabrikat av tre olika produktkategorier (sågade trävaror, träbaserade skivor och pappersprodukter) från den simulerade avverkningen. Utflödet är nedbrytningen från den nuvarande kolpoolen och inflödet av träprodukter och beräknas med specifika halveringstider per produktkategori (35 år för sågat, 25 år för skivor, och 2 år för papper). Resultat för markkol exkluderas från denna rapport (se avsnitt 1.2).

3 Resultat

3.1 Tillväxt och avgång

Nya resultat från Riksskogstaxeringen visar en vikande skogstillväxt de senaste 10 åren, främst i södra Sverige och i granskogar (P. Nilsson m.fl., 2022). Orsaken till den minskade tillväxten är oklar, men torkan verkar vara den viktigaste faktorn (Fridman m.fl., 2022). För att förstå hur tillväxten kommer att utvecklas i framtiden behövs ytterligare resultat från Riksskogstaxeringen och forskning. Avverkningen i svenska skogar har ökat markant sedan 1950-talet och har de senaste åren närmast sig tillväxten. Under de senaste åren ligger avverkningen på ungefär 90 miljoner m³sk per år⁷ vilket motsvarar 86 procent av nettotillväxten på skogsmarken (104 miljoner m³sk per år). Naturlig avgång har ökat de sista decennierna från 4–5 miljoner m³sk per år i 1980-talet till 16 miljoner m³sk per år idag (Kempe m.fl., 2000; P. Nilsson m.fl., 2022).

Modellresultaten vad gäller effekter av de utvalda åtgärderna tyder på att Vsk- leder till en ökning av bruttotillväxten⁸ med 7 procent jämfört med BAU år 2100 (Figur 3).



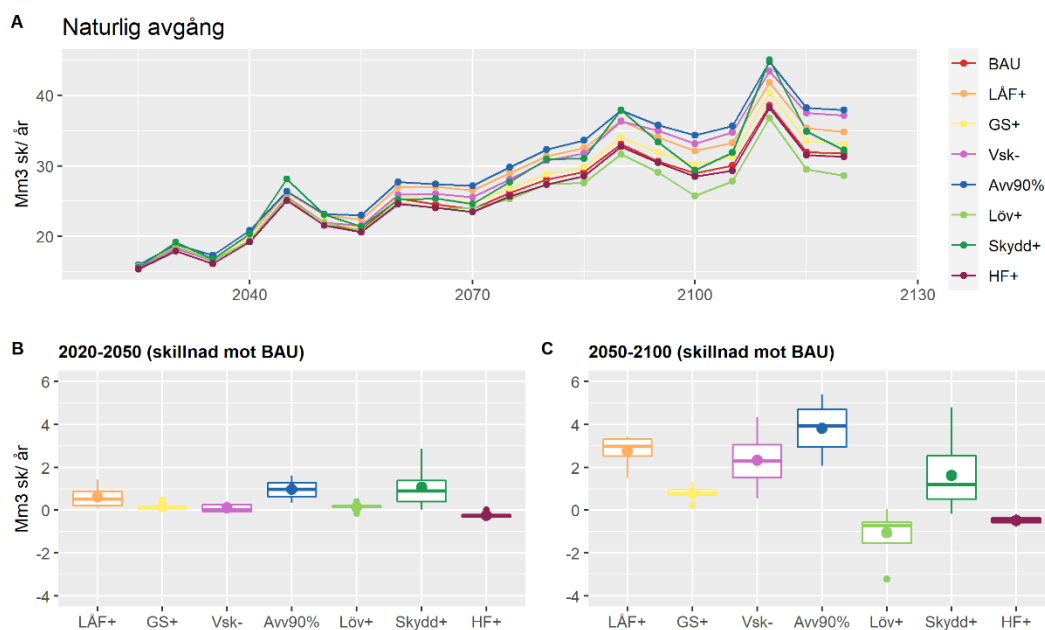
Figur 3 – Effekt av olika åtgärder på bruttotillväxten på produktiv skogsmark. A: utveckling av bruttotillväxt över tiden; B: bruttotillväxt i perioden 2020–2050 som skillnad mellan åtgärden och BAU; C: bruttotillväxt i perioden 2050–2100 som skillnad mellan åtgärden och BAU. Låddiagrammet visar resultat som medelvärdet i den hela perioden (punkt i boxen), medianvärdet (streck genom boxen), under och övre kvartilen (boxens nedre och övre linjer) samt minimum och maximum (nedre och övre vertikala linjer). En beskrivning av akronymer av åtgärderna finns i Tabell 2

⁷ m³sk står för skogskubikmeter och måttet innefattar trädens stamvolym inklusive bark men exklusive grenar och rötter.

⁸ Bruttotillväxten är den potentiella tillväxten under de lokala förutsättningarna och den aktuella skogsskötseln. Nettotillväxten är skillnaden mellan bruttotillväxt och naturlig avgång. Skillnad mellan nettotillväxt och avverkning utgör förrädsförändringen i skogen.

Åtgärderna Löv+ eller Skydd+ leder till motsatt effekt på bruttotillväxten som minskar med 7 respektive 3 procent år 2100. LÅF+ och i mindre grad Avv90% medför en positiv effekt på bruttotillväxt på kort och medellång sikt (+6 procent respektive +3 procent år 2050), men den positiva effekten minskar över tid (+1 procent år 2100). GS+ leder till en viss ökning både på kort och lång sikt (+2 procent). HF+ leder till en tillfällig ökning av bruttotillväxt på kort sikt (+1 procent år 2050) men en minskning på medellång och lång sikt (-2 procent år 2070 och -7 procent år 2100).

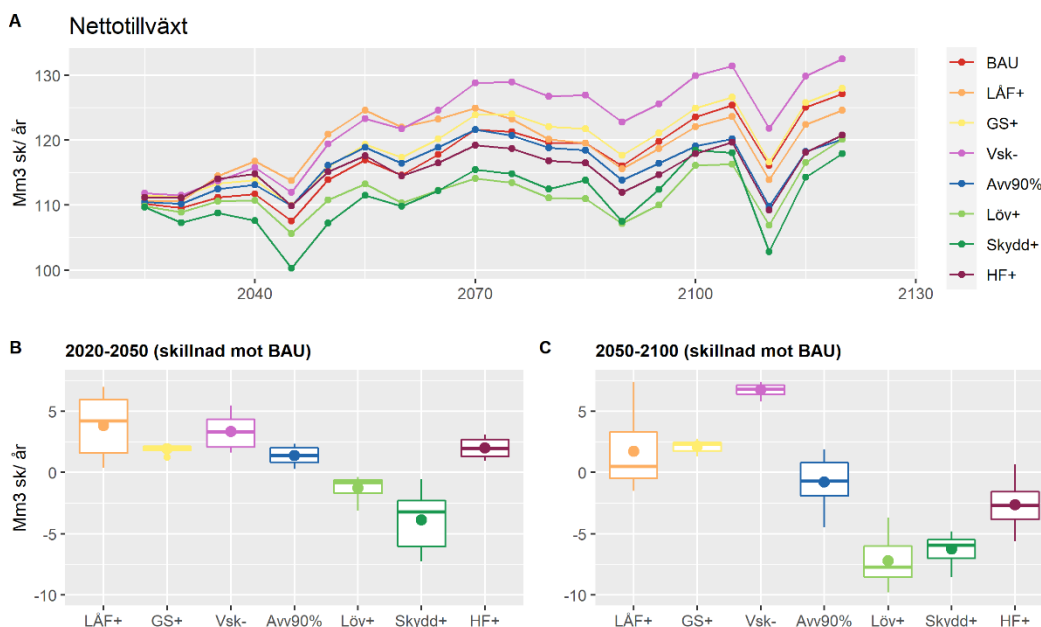
Ett förändrat skogsbruk har marginella effekter på naturlig avgång på kort sikt, men dessa effekter kan öka på lång sikt (Figur 4), främst kopplat till Avv90% där naturlig avgång ökar med 19 procent år 2100. Den naturliga avgången ökar på lång sikt också i Vsk- eller LÅF+ (+14 respektive +11 procent år 2100) och i mindre grad med GS+ (+4 procent). Alla åtgärder ökar den naturliga avgången förutom Löv+ som minskar tillväxten betydligt och därmed naturlig avgång (-11 procent år 2100). HF+ leder också till en viss minskning av naturlig avgång på lång sikt (-2 procent år 2100).



Figur 4 - Effekt av olika åtgärder på naturlig avgång på produktiv skogsmark. A: utveckling av naturlig avgång över tiden; B: naturlig avgång i perioden 2020–2050 som skillnad mellan åtgärden och BAU; C: naturlig avgång i perioden 2050–2100 som skillnad mellan åtgärden och BAU.

Kombinationen av effekter på bruttotillväxt och naturlig avgång ger upphov till ändringar i nettotillväxten (Figur 5). Till följd av lägre bruttotillväxt och högre naturlig avgång är nettotillväxten lägre på kort och lång sikt i Skydd+ (-6 procent år 2050 och -4 procent år 2100). Löv+ leder också till lägre nettotillväxt över hela simuleringsperioden på grund av att bruttotillväxten är betydligt lägre (-3 procent år 2050 och -6 procent år 2100). På grund av högre naturlig avgång blir nettotillväxten också lägre i Avv90%, men bara på lång sikt (-4 procent år 2100). Vsk- leder till högre nettotillväxt både på kort och lång sikt (+5 procent år 2050 och 2100) medan LÅF+ har positiva effekter på nettotillväxt bara på kort och medellång sikt (+6 procent år 2050 och +3 procent år 2070) men leder till en marginell minskning av nettotillväxten på lång sikt (-1 procent år 2100). GS+ har också en

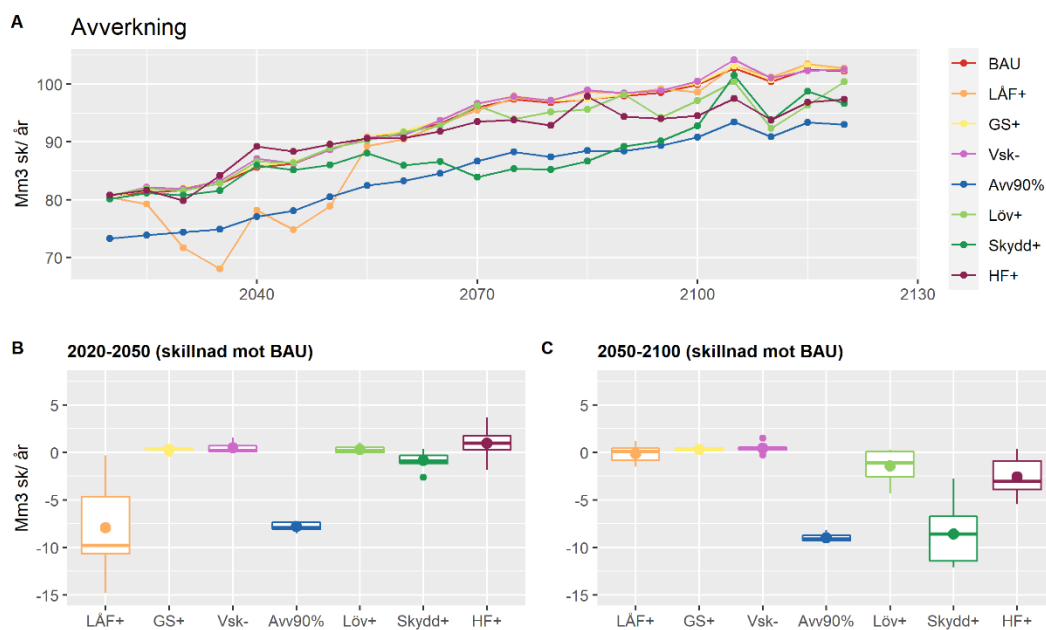
viss positiv effekt på nettotillväxt (+2 procent år 2050 och +1 procent år 2100 respektive), medan HF+ leder till en marginell positiv effekt på nettotillväxt på kort sikt (+1 procent år 2050) men en negativ effekt på lång sikt (-5 procent år 2100). På lång sikt simulerades en högre variation i nettotillväxten i alla scenarier på grund av mer frekventa skador.



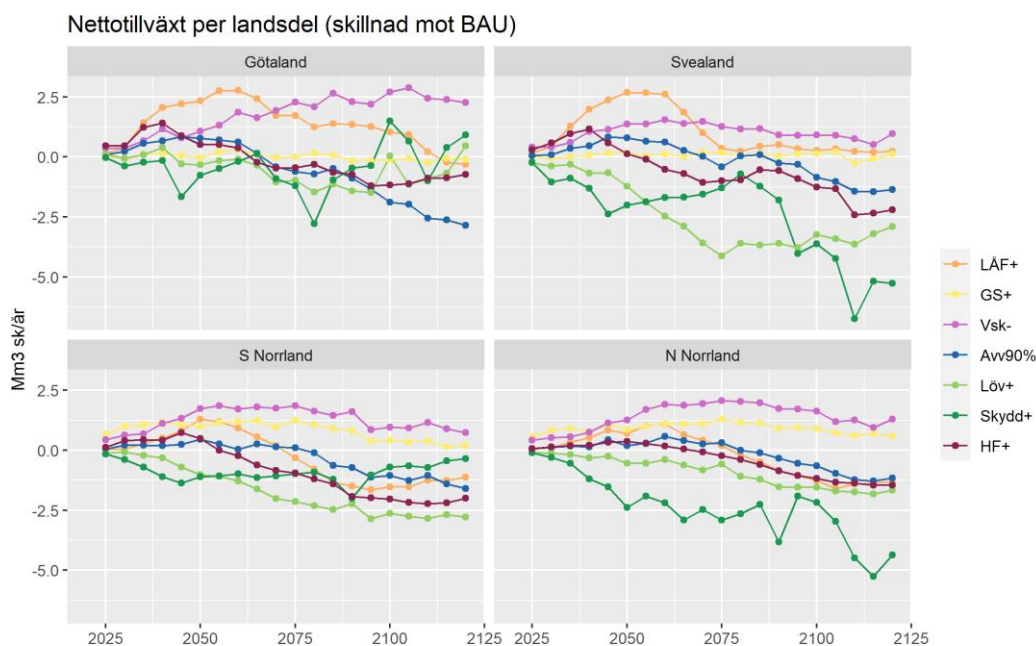
Figur 5 - Effekt av olika åtgärder på nettotillväxt på produktiv skogsmark. A: utveckling av nettotillväxt över tiden; B: nettotillväxt i perioden 2020–2050 som skillnad mellan åtgärden och BAU; C: nettotillväxt i perioden 2050–2100 som skillnad mellan åtgärden och BAU.

I modellberäkningarna eftersträvas att avverka en volym som motsvarar BAU i alla alternativ förutom Avv90%. Tillfälliga minskningar i avverkning jämfört med BAU i LÅF+, Löv+, Skydd+ och HF+ beror på att skogsarealen som har nått lägsta avverkningsålder inte räcker för att upprätthålla avverkningsnivån (Figur 6). Av denna anledning blir avverkning tillfälligt lägre i LÅF+ bara på kort sikt (-11 procent år 2050) och i HF+ på lång sikt (-5 procent år 2100) medan i Skydd+ minskar avverkning främst på medellång sikt med också på lång sikt (-13 procent år 2070 och -7 procent år 2100). En tillfällig ökning av avverkningen simulerades i HF+ 2030–2050 förmodligen på grund av luckhuggning som implementeras genom att dela avverkningsytan i två delar som avverkas i två olika perioder och därmed en försenad avverkning på andra delen av avverkningsytorna.

En analys av effekter av åtgärder på landsdelsnivå indikerar att Skydd+ kan ha mer negativa effekter på nettotillväxten i Svealand och Norra Norrland (Figur 7). I Götaland kan Skydd+ leda till en ökad variation i naturlig avgång och därmed till temporära förändringar i nettotillväxt. LÅF+ har positiva effekter på tillväxten främst i södra Sverige, där en högre nettotillväxt än i BAU förekommer över en längre period än i andra delar av landet. Löv+ leder till minskad nettotillväxt framför allt i Svealand, men också i Norrland. Denna åtgärd har mindre negativa effekter på tillväxten i Götaland. På grund av att GS+ genomförs främst i Norrland har åtgärden positiva effekter på tillväxt bara i Norrland. Avv90% och Vsk- har samma effekt i hela landet, alltså en minskning av nettotillväxt på lång sikt i Avv90% och en högre nettotillväxt i Vsk-.



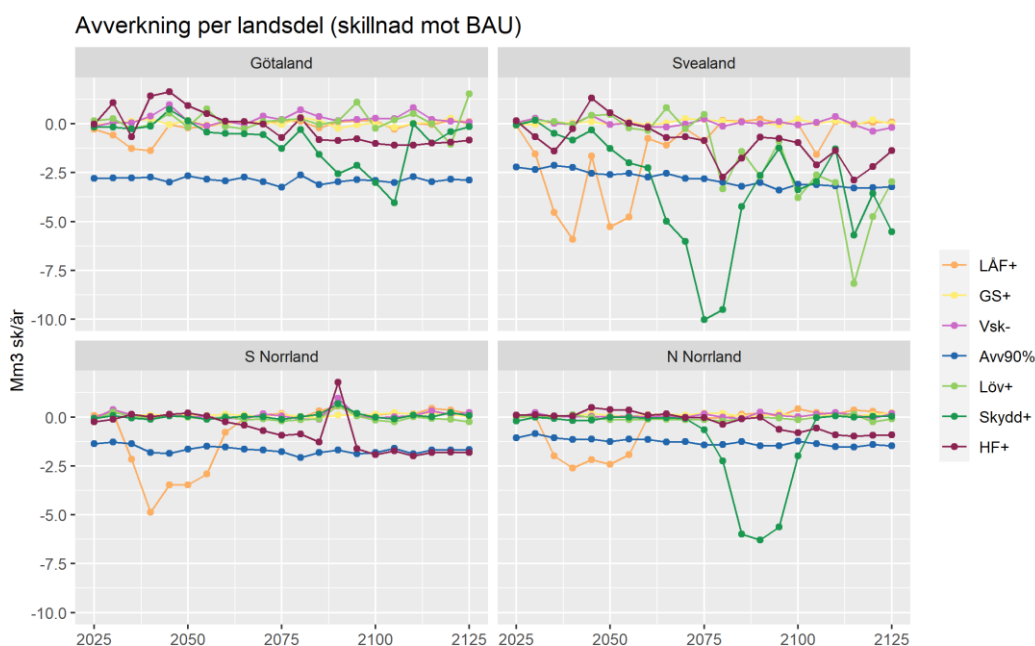
Figur 6 – Effekt av olika åtgärder på avverkning på produktiv skogsmark. A: utveckling av avverkning över tiden; B: avverkning i perioden 2020–2050 som skillnad mellan åtgärden och BAU; C: avverkning i perioden 2050–2100 som skillnad mellan åtgärden och BAU.



Figur 7 - Nettotillväxt på produktiv skogsmark i olika landsdelar (exklusive fjällnära skogar) som skillnad mellan åtgärden och BAU

I Skydd+ kan avverkningen inte upprätthållas i de flesta landsdelar (Figur 8). I Svealand där avverkningsnivån är högst, har Skydd+ en effekt på avverkningen som på lång sikt motsvarar effekten av Avv90%. Bara i södra Norrland kan avverkningen upprätthållas i Skydd+. LÅF+ har den största negativa effekten på avverkning i Svealand där förmodligen en lägre areal virkesproduktionsmark är

äldre än lägsta avverkningsålder. Den begränsade arealen äldre skog kan förklaras av den aktuella avverkningsnivån. Däremot har LÅF+ liten effekt på avverkningen i Götaland. Analysen på landsdelsnivå innefattar inte effekter i fjällnära skogar.



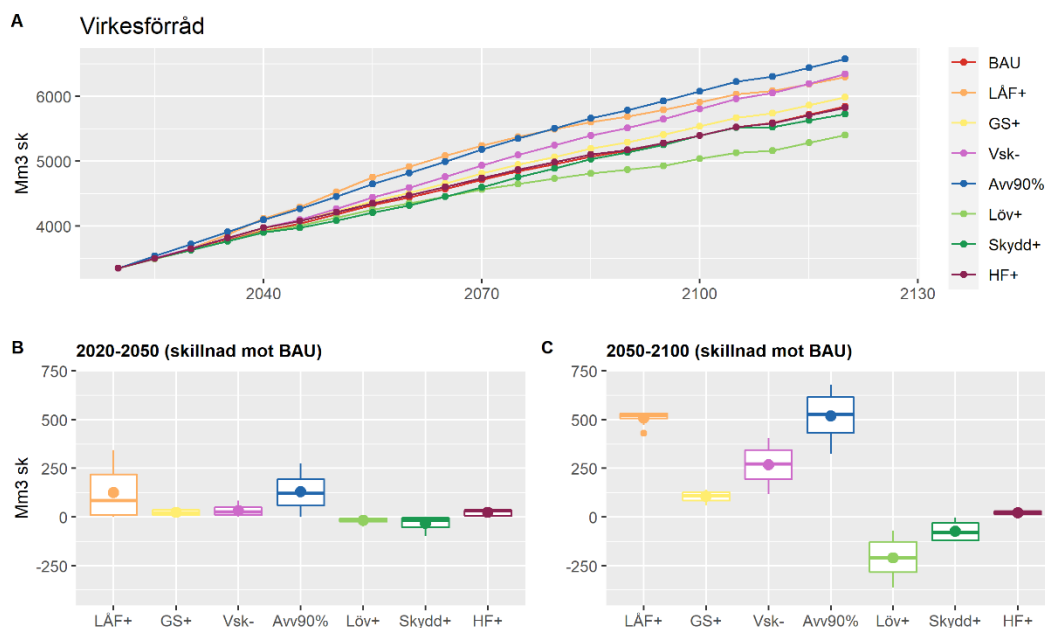
Figur 8 – Avverkning på produktiv skogsmark (exklusive fjällnära skogar) i olika landsdelar som skillnad mellan åtgärden och BAU.

3.2 Virkesförråd

Virkesförrådet⁹ i svenska skogar har kraftigt ökat sedan 1920-talet och skogen har därför varit en kolsänka i över 100 år i Sverige. Granskogar bidrog framför allt till ökningen i produktiv skogsmark fram till 1970-talet, men sedan 1990-talet har deras volym blivit mer stabil med undantag av fluktuationer efter stormen Gudrun (P. Nilsson m.fl., 2021). Volymen av tall, contorta, björk och andra lövträd i produktiv skogsmark har stadigt ökat sedan 1980-talet (P. Nilsson m.fl., 2022).

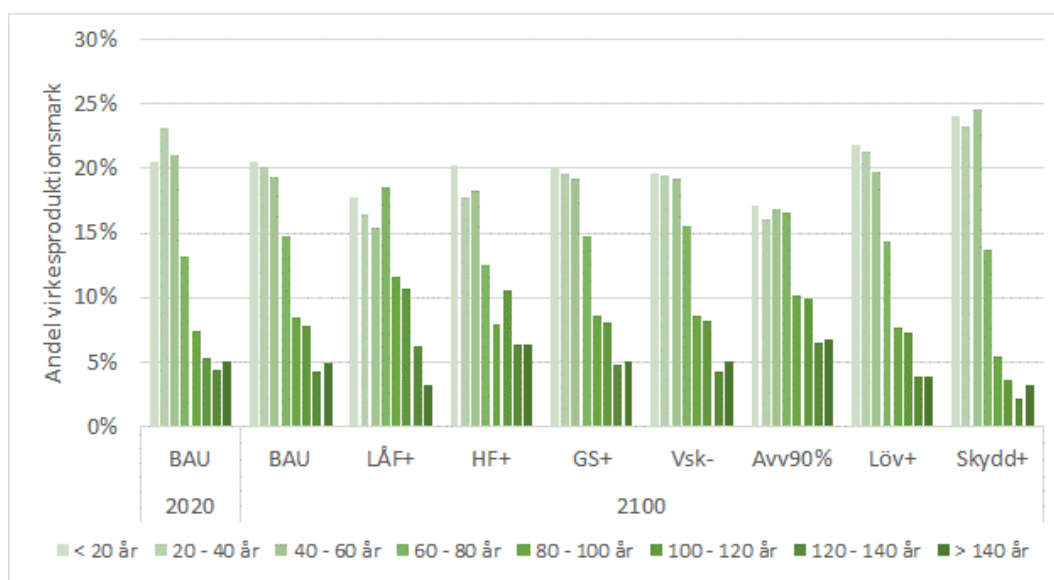
Enligt modellresultaten kommer virkesförrådet att öka i framtiden i Sverige oberoende av vilken åtgärd som genomförs (Figur 9). Ökningen blir dock betydligt högre på kort och lång sikt i Avv90% (+7 procent år 2050 och +13 procent år 2100) eller i LÅF+ (+8 procent år 2050 och +9 procent år 2100) jämfört med BAU. Vsk-leder också till högre virkesförråd, men främst på lång sikt (+8 procent år 2100) och en viss ökning sker också på lång sikt i GS+ (+3 procent). Små ändringar jämfört med BAU sker på kort sikt i GS+ (+1 procent), Skydd+ (-2 procent), HF+ (+1 procent) eller Löv+ (-1 procent). På lång sikt blir virkesförrådet betydligt lägre bara i Löv+ (-7 procent).

⁹⁹ Virkesförråd definieras som volym av levande träd



Figur 9 - Effekt av olika åtgärder på virkesförråd på produktiv skogsmark. A: virkesförråds utveckling över tiden; B: virkesförråd i perioden 2020–2050; C: virkesförråd i perioden 2050–2100. Resultat i B och C anges som skillnad mellan åtgärden och BAU.

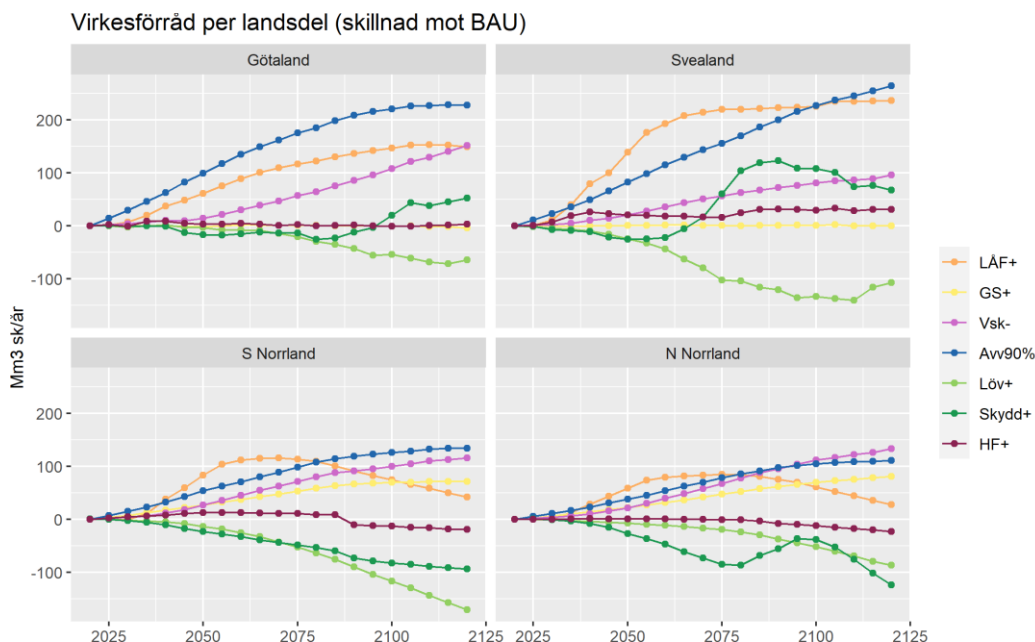
Förändringen av virkesförrådet kan oftast kopplas till förändrad åldersklassfördelning i skogen. Den positiva effekten av Avv90% eller LÅF+ på virkesförråd bero på att skogen blir i genomsnitt äldre än i BAU (Figur 10). I LÅF+ ökas skogsarealen som är 60 till 100 år gammal mest medan Avv90% leder till att arealen i alla åldersklasser över 60–80 år ständigt ökar över tiden.



Figur 10 – Andel virkesproduktionsmark i olika åldersklasser i 2100 jämfört med 2020 när olika åtgärder genomförs. År 2020 är fördelningen detsamma i alla scenarier.

Effekten av åtgärden på virkesförråd skiljer sig mellan olika delar av landet (Figur 11). Enligt modellen kan Avv90% ha störst potential att öka virkesförrådet i Götaland, men i andra delar av landet kan LÅF+ öka virkesförrådet mest på medellång sikt. I Norrland kan Vsk- spela en viktig roll både på medellång och lång sikt, men har en lägre effekt i södra Sverige och bara på lång sikt. Modellresultaten

indikerar att virkesförrådet i HF+ är på ungefär samma nivå som i BAU, med en marginell positiv effekt i Svealand och negativ i Norrland på lång sikt. GS+ har potential att öka virkesförråd i Norrland men inte i Svealand och Götaland där arealen skogsmark som gödslas är liten.



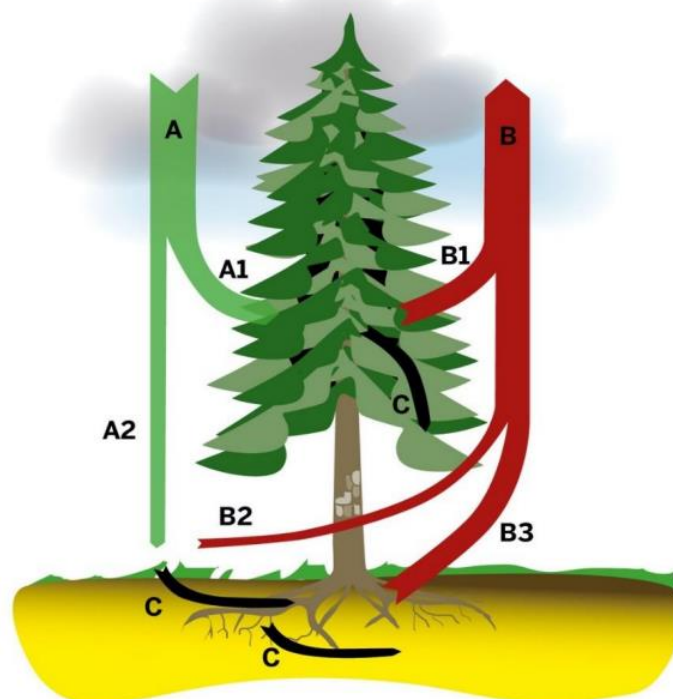
Figur 11 – Virkesförråd på produktiv skogsmark (exklusive fjällnära skogar) i olika landsdelar som skillnad mellan åtgärden och BAU

3.3 Kolflöden och kolförråd

Skogsbrukets påverkan på skogstillväxten och avgången leder till förändringar i skogens kolbalans och därmed i kol som lagras in i ekosystemet och i träprodukter samt i kol som släpps tillbaka till atmosfären. I detta avsnitt presenteras effekter av de utvalda åtgärderna på kolflöden och kolförråd i skogen (exklusive mark) och träprodukter.

3.3.1 Kolflöden

Kolflödet mellan skogsekosystemet och atmosfären kan vara positivt eller negativt och beror på balansen mellan tillväxt och avgång (både naturlig avgång och avverkning). En del av kolet som tas ut från ekosystemet genom avverkning kan lagras in i träprodukter och släpps därmed inte ut till atmosfären direkt (Figur 12). Därför bör förändringarna i träprodukters kolförråd inkluderas i beräkningar för att uppskatta kolflöden från skogen till atmosfären.



Figur 12 – Kolflöden i skogen. A: upptag av koldioxid genom fotosyntes i trädbiomassa (A1) och markvegetation (A2). B: utsläpp av koldioxid genom respiration från träd (B1) och markvegetation (B2) samt nedbrytning av organiskt material i skogen (B3). Del av kolet i levande biomassa överförs till kolpooler i förna och organiskt material i marken (C). Kolflöden till och från träprodukter inkluderas inte i figuren. Förlaga: Peter Robertz i Skogsstyrelsen (2020b).

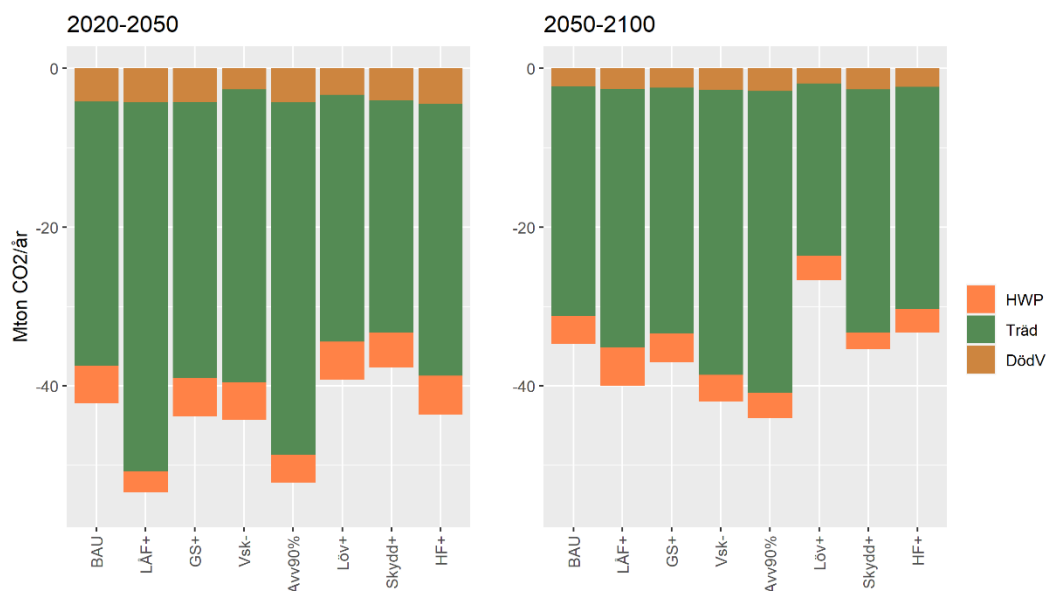
Ett positivt kolflöde motsvarar ett utsläpp av koldioxid till atmosfären och sker när utsläpp av kol från skogsekosystemet och träprodukter är högre än inlagring av kol i skogen och träprodukter. Ett negativt kolflöde betyder att skogen samt träprodukter är en kolsänka, alltså det totala kolförrådet i skogen och träprodukter ökar över tiden.

Tack vare ett växande virkesförråd, har svenska skogar varit en kolsänka över 100 år. Skogens förmåga att fortsätta fungera som en kolsänka beror på flera faktorer, inklusive balansen mellan tillväxt och avverkning samt skador, men också på andra faktorer som, bland annat, åldersklassfördelningen, trädslag, klimat och atmosfäriskt nedfall.

Modellresultaten indikerar att svenska skogar och träprodukter kommer fortsätta att vara kolsänkor under de kommande 100 åren, men sänkan kommer att minska över tiden (Figur 13). Enligt modellen kommer kolsänkan i träd, död ved och träprodukter i BAU att vara -42,2 Mton CO₂/år fram till 2050 och -37,5 Mton CO₂/år fram till 2100. Den kolpool som spelar störst roll som kolsänka är trädbiomassan i och med att markkolet exkluderas. De åtgärder som har störst positiv effekt på kolinlagring är Avv90% och LÅF+ både på kort och lång sikt (-9,6 respektive -7,5 Mton CO₂/år fram till 2100). LÅF+ leder till en tillfälligt lägre kolinlagring i produkter än i BAU på kort sikt (+2,1 Mton CO₂/år fram till 2050), men den blir på samma nivå som i BAU på lång sikt. Vsk- har också positiva effekter på kolinlagring jämfört med BAU, särskilt på lång sikt (-5,2 Mton CO₂/år fram till 2100). Detta resultat är i linje med den ökande positiva effekten över tid

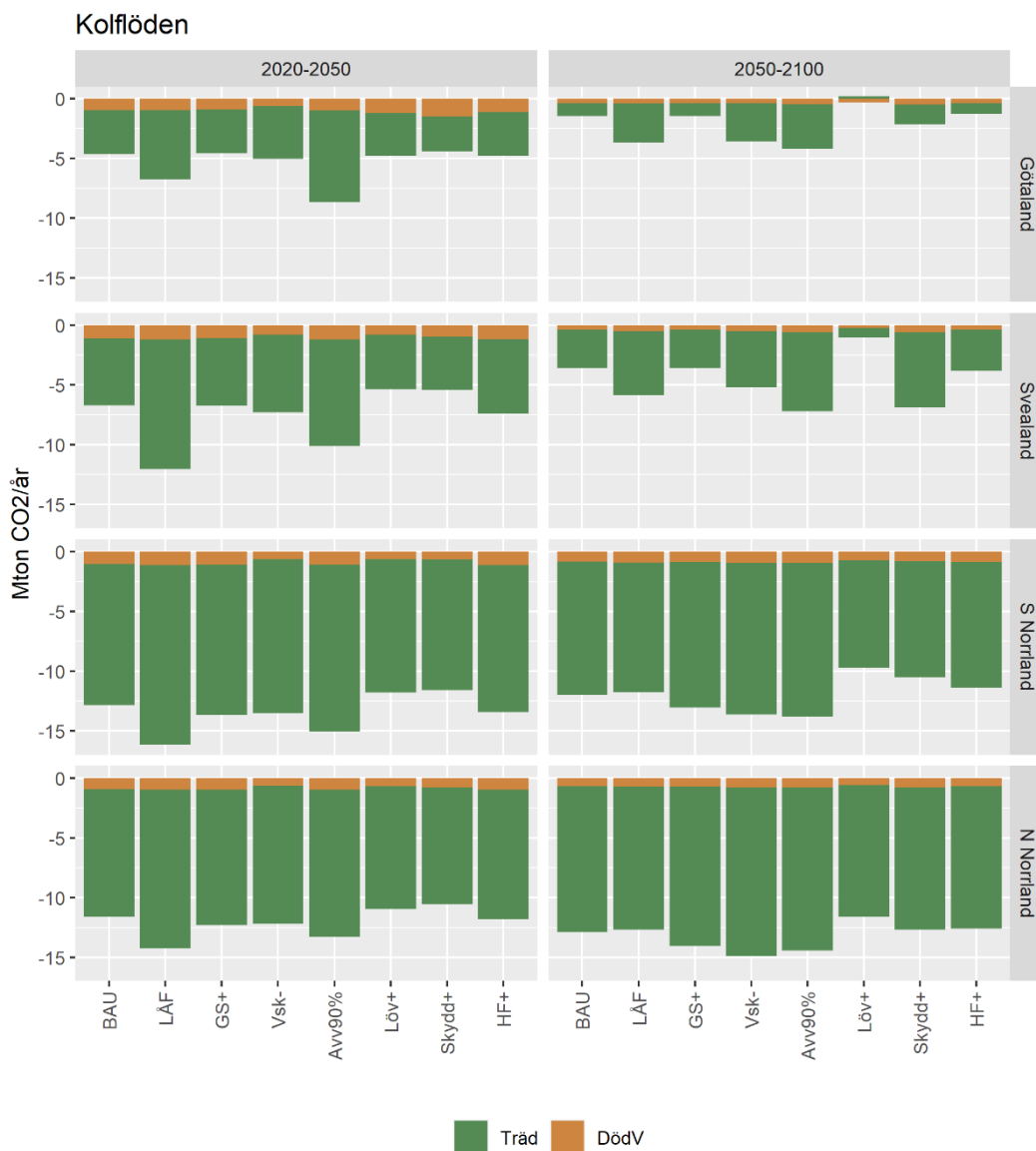
som Vsk- har på tillväxten (Figur 3). På grund av minskad naturlig avgång, leder dock Vsk- till en lägre kolsänka i död ved än i BAU. Negativa effekter på kolinlagring förekommer i Löv+ eller Skydd+ (+6,2 respektive +1,3 Mton CO₂/år till 2100). Den negativa effekten på kolsänkan ökar över tiden i Löv+ medan den avtar i Skydd+. GS+ har en begränsad positiv effekt på kolinlagring och HF+ leder till en kolsänka som är ungefär på samma nivå som i BAU (Figur 13 och Tabell 3).

Kolflöden



Figur 13 – Koldioxidupptag i olika kolpooler över olika perioder (2020–2050; 2050–2100) när utvalda åtgärder genomförs på produktiv skogsmark. Data i figuren är medelvärden över hela perioden i miljoner ton koldioxid per år. HWP: träprodukter; Träd: levande trädbiomassa; DödV: död ved i skogen. En beskrivning av åtgärder finns i Tabell 2

Analysen på regional nivå (Figur 14, Tabell 3) tyder på att skogarna i Norrland spelar betydligt större roll som kolsänka än skogarna i södra Sverige främst på grund att avverkningsnivån är lägre i Norrland och i mindre grad på grund att arealen produktiv skogsmark är större i Norrland. Avv90% och LÅF+ ökar kolsänkan i alla landsdelar på kort och lång sikt, medan Vsk- kan ha effekt på lång sikt. Den åtgärd som framför allt leder till minskad kolsänka jämfört med BAU är Löv+, särskilt i Svealand (+2,1 Mton CO₂/år till 2100). Skydd+ leder också till minskad kolsänka i hela landet på kort sikt, men på lång sikt avtar effekten. I Svealand kan Skydd+ leda till en ökad kolsänka jämfört med BAU på lång sikt. GS+ har positiva effekter bara i Norrland där åtgärden genomförs i störst utsträckning och HF+ kan leda till en begränsad positiv effekt på kort sikt i alla landsdelar, men effekten avtar på lång sikt.



Figur 14 – Kolflöden i skogen (exklusive i marken) i olika delar av landet över olika perioder (2020–2050; 2050–2100) på produktiv skogsmark (exklusive fjällnära skogar).

Tabell 3 – Kolflöden (Mton CO2/år) per landsdel och kolpoolen på kort sikt (2020–2050) eller lång sikt (2020–2100). Kolflöden per åtgärd visas som skillnad mot kolflöden i samma kategori i BAU scenario. Notera att data på lång sikt är ett medelvärde från 2020 till 2100.

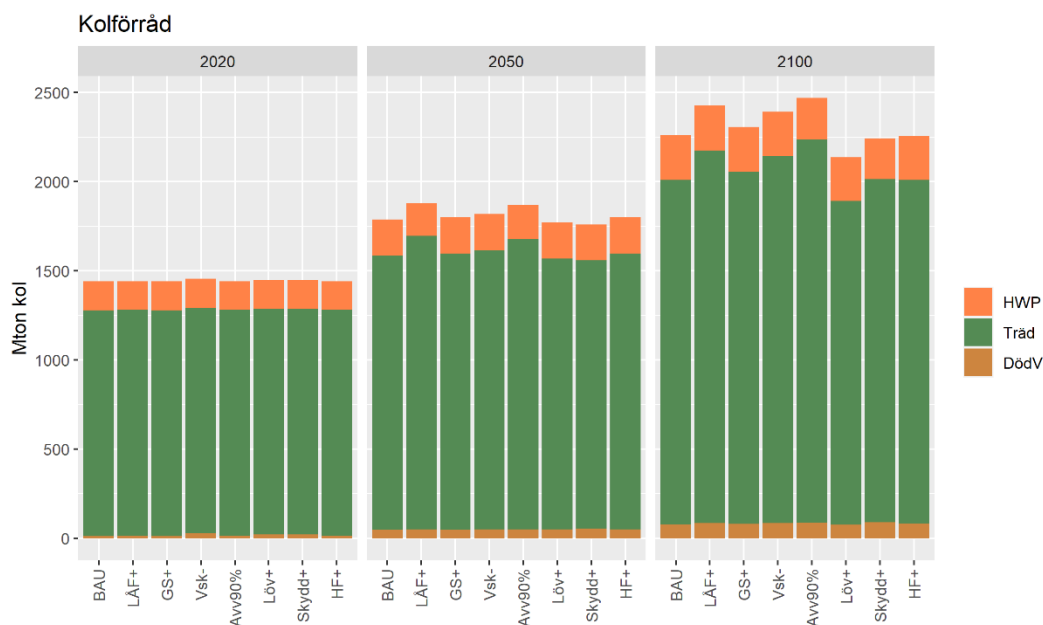
Period	Landsdel	Kolpoolen	BAU	Skillnad mot BAU						
				LÄF+	GS+	Vsk-	Avv90%	Löv+	Skydd+	HF+
				Mton CO2/år						
2020–2050	Götaland	Träd	-3,7	-2,11	0,06	-0,72	-3,97	0,11	0,81	0,04
		Död ved	-0,9	-0,02	0,00	0,30	-0,06	-0,28	-0,58	-0,20
		Total	-2,3	-1,06	0,03	-0,21	-2,02	-0,08	0,12	-0,08
	Svealand	Träd	-5,6	-5,20	-0,05	-0,89	-3,32	1,01	1,13	-0,62
		Död ved	-1,1	-0,12	0,01	0,31	-0,09	0,31	0,16	-0,08
		Total	-3,3	-2,66	-0,02	-0,29	-1,71	0,66	0,65	-0,35
	S Norrland	Träd	-11,8	-3,24	-0,80	-1,12	-2,17	0,65	0,87	-0,49
		Död ved	-1,0	-0,09	-0,06	0,43	-0,07	0,39	0,37	-0,09
		Total	-6,4	-1,67	-0,43	-0,35	-1,12	0,52	0,62	-0,29
	N Norrland	Träd	-10,7	-2,60	-0,68	-0,85	-1,63	0,40	0,95	-0,16
		Död ved	-0,9	-0,05	-0,03	0,29	-0,05	0,25	0,11	-0,05
		Total	-5,8	-1,33	-0,35	-0,28	-0,84	0,32	0,53	-0,11
	Sverige	Träd	-33,3	-13,17	-1,47	-3,58	-11,09	2,23	4,06	-0,97
		Död ved	-4,2	-0,12	-0,07	1,50	-0,11	0,83	0,15	-0,28
		HWP	-4,7	2,11	-0,10	0,05	1,25	-0,08	0,28	-0,17
Total		-42,2	-11,19	-1,64	-2,04	-9,95	2,97	4,49	-1,42	
2020–2100	Götaland	Träd	-2,1	-2,15	0,01	-1,59	-3,16	0,85	-0,07	0,12
		Död ved	-0,6	-0,04	0,00	0,10	-0,09	-0,08	-0,30	-0,09
		Total	-1,3	-1,10	0,01	-0,75	-1,62	0,38	-0,19	0,02
	Svealand	Träd	-4,1	-3,31	-0,02	-1,28	-3,39	1,89	-1,52	-0,39
		Död ved	-0,6	-0,13	0,00	0,05	-0,16	0,19	-0,06	-0,04
		Total	-2,4	-1,72	-0,01	-0,61	-1,78	1,04	-0,79	-0,21
	S Norrland	Träd	-11,4	-0,99	-0,91	-1,33	-1,84	1,62	1,26	0,25
		Död ved	-0,9	-0,09	-0,06	0,07	-0,13	0,22	0,16	-0,07
		Total	-6,2	-0,54	-0,49	-0,63	-0,98	0,92	0,71	0,09
	N Norrland	Träd	-11,6	-0,78	-0,92	-1,45	-1,48	0,91	0,57	0,15
		Död ved	-0,8	-0,07	-0,06	0,02	-0,10	0,13	-0,04	-0,03
		Total	-6,2	-0,42	-0,49	-0,72	-0,79	0,52	0,27	0,06
	Sverige	Träd	-30,6	-7,21	-1,84	-5,73	-9,86	5,36	0,42	0,24
		Död ved	-3,0	-0,26	-0,12	0,30	-0,41	0,53	-0,17	-0,15
		HWP	-4,0	-0,02	-0,09	0,12	0,70	0,26	1,03	0,29
Total		-37,5	-7,49	-2,05	-5,31	-9,57	6,15	1,29	0,38	

3.3.2 Kolförråd

Kolet lagras i skogen som kolförråd i levande träd, död ved, förna och mark. Markkol utgör största delen av kolförrådet i skogsekosystemet. Det uppskattades att markkolet i mineraljordar är ungefär 60 procent av det totala kolförrådet (Stendahl m.fl., 2017), men också att markkolet har varit ganska stabilt över tiden eftersom förändringarna sker över lång tid (Skogsstyrelsen, 2020b). Notera att markkol inte ingår i effektanalyserna i den här rapporten. Därför utgör kolförrådet i levande träd huvuddelen av det återstående förrådet.

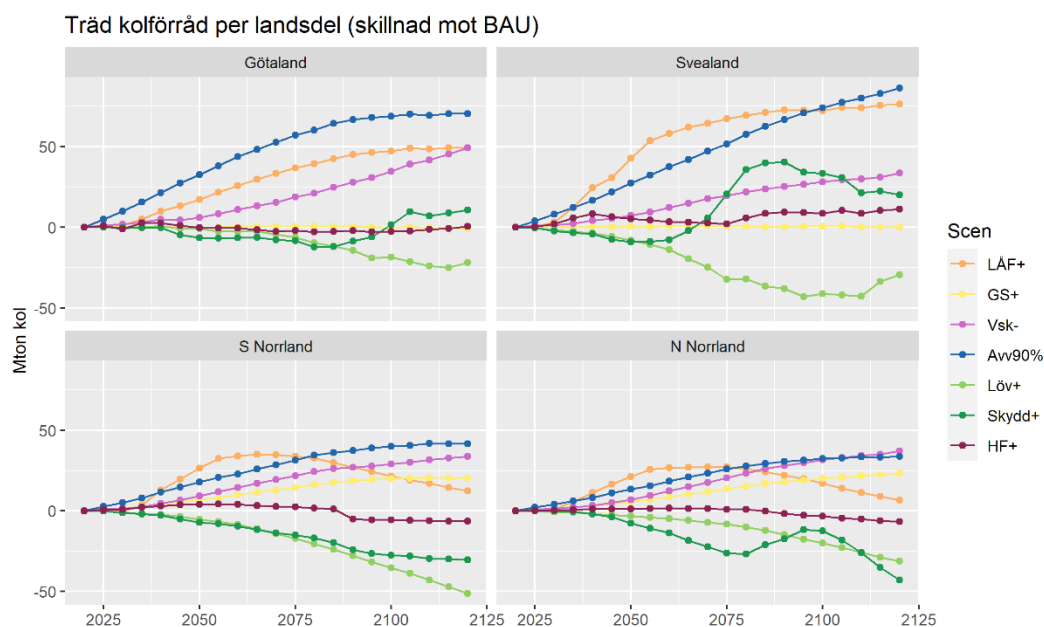
På grund av det positiva kolflödet i skogsekosystemet och träprodukter, kommer kolförrådet i levande träd, död ved och träprodukter att öka över tiden enligt modellen (Figur 15, Tabell 4). Modellen uppskattar ett totalt kolförråd på 1440 miljoner ton kol år 2020 i BAU som ökar med ungefär en fjärdedel (+24 procent) till år 2050 och med 57 procent till år 2100. Den kolpool som mest bidrar till förändringar i det simulerade kolförrådet är levande trädbiomassa.

Åtgärdernas effekt på kolförrådet är i linje med effekten på kolsänkan. LÅF+ och Avv90% leder till ett ökat kolförråd jämfört med BAU på kort sikt (+5 procent respektive +4 procent) och lång sikt (+7 procent och +9 procent). Båda två åtgärderna leder till en minskning av kolförrådet i träprodukter, men denna är betydligt mindre än effekten i skogen. Vsk- har främst positiv effekt på kolförrådet på lång sikt, motsvarande en ökning med 6 procent jämfört med BAU. Löv+ och Skydd+ har begränsade negativa effekter på kolförrådet på kort sikt (-1 procent och -2 procent). Den negativa effekten ökar i Löv+ på lång sikt (-6 procent i 2100), men blir fortfarande marginell i Skydd+ (-1 procent). GS+ och HF+ leder till ett kolförråd som är på ungefär samma nivå som i BAU. HF+ leder dock till en positiv effekt på kolförrådet i död ved.



Figur 15 – Kolförråd i olika kolpooler över tiden på produktiv skogsmark i Sverige. HWP: träprodukter; Träd: trädbiomassa; DödV: död ved

På regional nivå (Figur 16, Tabell 4) har Avv90% den största effekten i Götaland och Svealand och leder till 8–9 procent ökning i kolförrådet i levande träd och död ved år 2050 och 18 procent ökning år 2100 som motsvarar en ökning med 71–77,5 Mton kol i slutet av seklet. Avv90% har positiv effekt på kort och lång sikt också i Norrland men ökningen är mindre (+34,5–43 Mton kol året 2100). LÅF+ har också störst effekt i södra Sverige, särskilt i Svealand där effekten är ungefär på samma nivå som i Avv90%. I Norrland har LÅF+ däremot bara en temporär positiv effekt. GS+ leder till ökat kolförråd bara i Norrland (+4 procent år 2100). Löv+ leder till en minskning av kolförrådet som på lång sikt är störst i Svealand (-10 procent). Skydd+ har en negativ effekt på kolförrådet över hela perioden i Norrland, men har en positiv effekt på lång sikt i Svealand (+9 procent år 2100) och marginell effekt i Götaland. Skydd+ har dock en positiv effekt på kolförrådet i död ved i hela landet. Vsk- har samma långsiktiga positiva effekt i hela landet och HF+ påverkar inte kolförrådet jämfört med BAU.



Figur 16 – Kolförråd i trädbiomassan i olika delar av landet på produktiv skogsmark (exklusive fjällnära skogar). Data visas som skillnad mot kolförrådet i dagens skogsbruk (BAU).

Tabell 4 – Kolförråd per landsdel och kolpoolen i olika perioder. Kolförrådet per åtgärd visas som skillnad mot kolförrådet i samma kategori i BAU scenario

Period	Landsdel	Kolpoolen	BAU	Skillnad mot BAU						
				LÄF+	GS+	Vsk-	Avv90%	Löv+	Skydd+	HF+
				Mton kol						
2050	Götaland	Träd	371,5	17,2	-0,5	5,9	32,5	-0,9	-6,6	-0,3
		Död ved	10,5	0,2	0,0	0,5	0,5	-0,4	2,1	1,6
		<i>Total</i>	382,0	17,5	-0,5	6,4	33,0	-1,3	-4,6	1,3
	Svealand	Träd	359,9	42,6	0,4	7,3	27,2	-8,2	-9,2	5,1
		Död ved	11,8	1,0	-0,1	0,5	0,7	0,6	1,8	0,6
		<i>Total</i>	371,7	43,6	0,3	7,9	27,9	-7,7	-7,5	5,7
	S Norrland	Träd	391,3	26,5	6,5	9,2	17,7	-5,3	-7,1	4,0
		Död ved	12,1	0,8	0,5	0,6	0,6	0,9	1,0	0,7
		<i>Total</i>	403,5	27,3	7,0	9,7	18,3	-4,5	-6,0	4,7
	N Norrland	Träd	345,1	21,3	5,5	6,9	13,4	-3,3	-7,8	1,3
		Död ved	10,3	0,4	0,3	0,6	0,4	0,9	2,1	0,4
		<i>Total</i>	355,4	21,8	5,8	7,5	13,8	-2,3	-5,7	1,6
Sverige	Träd	1537,3	107,8	12,0	29,4	90,7	-18,2	-33,1	7,9	
	Död ved	47,6	2,6	0,6	2,4	2,4	2,2	7,6	3,7	
	HWP	201,8	-18,2	0,7	-0,1	-12,8	0,7	-1,4	1,7	
	Total	1786,7	92,2	13,3	31,6	80,3	-15,4	-26,9	13,2	
2100	Götaland	Träd	386,3	47,0	-0,2	34,7	68,8	-18,5	1,6	-2,7
		Död ved	15,2	1,0	0,0	0,9	1,9	-0,9	3,9	1,9
		<i>Total</i>	401,5	48,0	-0,2	35,6	70,8	-19,4	5,5	-0,9
	Svealand	Träd	403,3	72,2	0,5	28,0	74,0	-41,2	33,3	8,6
		Död ved	17,0	2,8	-0,1	1,9	3,6	-1,0	4,4	0,8
		<i>Total</i>	420,3	75,0	0,4	29,9	77,5	-42,3	37,6	9,3
	S Norrland	Träd	544,0	21,6	19,8	29,0	40,1	-35,3	-27,5	-5,6
		Död ved	23,2	1,9	1,4	2,6	2,7	-0,7	0,6	1,5
		<i>Total</i>	567,2	23,6	21,2	31,6	42,8	-36,1	-26,9	-4,1
	N Norrland	Träd	511,9	17,0	20,1	31,7	32,3	-20,0	-12,5	-3,4
		Död ved	19,3	1,5	1,2	2,7	2,2	0,1	3,8	0,7
		<i>Total</i>	531,1	18,5	21,4	34,4	34,5	-19,8	-8,7	-2,6
Sverige	Träd	1931,6	157,4	40,2	125,0	215,1	-116,9	-9,1	-5,4	
	Död ved	78,6	7,1	2,5	8,2	10,4	-2,6	12,6	4,6	
	HWP	251,5	-0,3	2,0	-2,5	-18,2	-5,6	-23,4	-5,4	
	Total	2261,6	164,2	44,8	130,6	207,2	-125,0	-19,9	-6,2	

4 Diskussion

Modellresultaten är begränsade till effekten som de utvalda åtgärderna har på kolsänkan i svenska skogar och i träprodukter och innefattar inte en analys av den totala klimatnyttan som åtgärderna kan leda till vilket skulle kräva en uppskattning av effekten på substitution av fossilbaserade produkter samt emissionsläckage. Dessutom påverkas storleken på effekten på kolsänkan av åtgärdernas omfattning - såsom arealen där en åtgärd genomförs - vilket begränsar möjligheten att dra slutsatser om vilka åtgärder som har störst potential att öka kolsänkan i svenska skogar.

Minskad avverkning

Avv90% är enligt modellresultaten en åtgärd som leder till ökad kolsänka både på kort (30 år) och lång (80–100 år) sikt. Kolsänkan ökar jämfört med BAU i hela Sverige, men effekten blir störst i södra Sverige där skogarna är mer produktiva och avverkningsnivån idag är nästan på samma nivå som tillväxten. Liknande resultat togs fram i Skytt m. fl. (2021) som baseras på länsvisa simuleringar med Heureka RegVis.

Avv90% ökar kolsänkan med 9,57 Mton CO₂/år i genomsnitt för perioden 2020–2100. På kort sikt är ökningen ungefär på samma nivå med 9,95 Mton CO₂/år fram till 2050. Ökningen av kolsänkan i trädbiomassa och död ved är dock högre än de ovan nämnda siffrorna eftersom kolsänkan i träprodukter samtidigt minskar (0,7 Mton CO₂/år mindre jämfört med BAU). Andra faktorer kan också minska den potentiella positiva climateffekten som Avv90% kan leda till, exempelvis läckage genom att avverkningen i stället genomförs i andra länder, minskad substitution och ökad risk för skador på skogen.

Om avverkningen minskar utan att efterfrågan på träråvaror minskar samtidigt finns det risk att träråvaror importeras från andra länder eller substitueras med fossilbaserade råvaror. En nyligen publicerad rapport uppskattade att bara en del av den minskade avverkningen i Sverige skulle kunna kompenseras genom ökad avverkning i andra länder (Skogsstyrelsen, 2022a). Uppskattningen av läckageeffekten av en minskad avverkning i Sverige är omkring 25 procent för sågtimmer och 50 procent för massaved. Om man antar att 50 procent av den minskade avverkningen skulle kompenseras i andra länder, kan man grovt beräkna att Avv90% skulle kunna leda till ungefär 4,9 Mton CO₂/år ökad kolsänka i genomsnitt under perioden 2020–2100, alltså hälften av den totala potentialen enligt modellberäkningarna. Genom att välja den högsta läckageeffekten (50 procent) kan uppskattningen betraktas som konservativ. Uppskattningen tar dock inte hänsyn till högre utsläpp som kan kopplas till minskad effektivitet när man importerar råvara (t.ex. transport eller andra skogsbruksmetoder).

Om avverkningen minskar finns det också risk att möjligheten till substitution av fossilbaserade produkter minskar och därmed att utsläpp av fossil koldioxid ökar jämfört med BAU, särskilt när efterfrågan på träprodukter förväntas öka (Skogsstyrelsen, 2015b). Resultat från forskning visar att substitutionseffekten varierar kraftigt beroende på typ av produkt, material som substitueras, produktionsteknologi och träproduktens kretslopp samt på i vilken omfattning

avverkningsvolymen leder till substitution och tidsperspektiven som antas. Beroende på vilka antaganden som görs kan en minskad substitution i mindre eller högre grad påverka den totala klimatnytta som en minskad avverkning kan medföra (Gustavsson m.fl., 2017; Leskinen m.fl., 2018; Schulte m.fl., 2022). Risken för minskad substitution kan minskas genom att öka effektiviteten eller återvinningen av träbaserade produkter, men ytterligare analys behövs för att fördjupa kunskapen om hur och i vilken omfattning träförsörjningskedjan kan effektiviseras (Ahn m.fl., 2022; Husgafvel m.fl., 2018; Nunes m.fl., 2020). Om det finns en politisk vilja att åstadkomma en ökad kolsänka i skogen genom en minskad avverkning behöver det införas styrmedel som kan skapa incitament för detta.

Modellresultaten indikerar att Avv90% leder till ett högre biomassförråd i skogen och att skogen blir äldre i genomsnitt, vilka är faktorer som kan öka risken för skador. Risken blir särskilt hög i enskiktade skogar som är dominerade av ett trädslag när åldern ökas i genomsnitt. Det finns dock flera skogliga strategier som kan användas för att minska avverkning, till exempel att förlänga omloppstiden, skydda delar av den produktiva skogsmarken och genom ökad miljöhänsyn. Hur minskad avverkning påverkar risken för skador kan bero på hur och i vilken kombination dessa strategier genomförs på landskapsnivå. Åtgärder som är anpassade till lokala förutsättningar kan minska risken för skador när variationen i skogslandskapet ökas (Messier m.fl., 2019, 2022), men ytterligare analys krävs för att identifiera strategier på landskapsnivå som kan leda till synergier mellan minskad avverkning och klimatanpassning.

Förlängd omloppstid

LÅF+ har också positiva effekter på kolsänkan, främst genom att åtgärden leder till en minskad avverkning i början av simuleringsperioden. LÅF+ leder till en ökad kolsänka jämfört med BAU på 11,2 Mton CO₂/år fram till 2050. Samtidigt leder LÅF+ till en kraftig minskning av kolsänkan i träprodukter (2,22 Mton CO₂/år), vilken dock avtar med tiden tills kolsänkan i träprodukter blir ungefär på samma nivå som i BAU. Effekten av LÅF+ på skogens kolbalans är högre än av Avv90% på kort sikt (20 år) på grund av att avverkningen tillfälligt minskar mer än 10 procent jämfört med BAU. Avverkningen minskar kraftigt i början av simuleringsperioden i Svealand och Norrland på grund av att arealen som kan avverkas enligt restriktionerna om lägsta avverkningsålder inte räcker för att upprätthålla avverkningsnivån. Till skillnad från Avv90%, eftersträvas i LÅF+ att avverka en volym som motsvarar avverkningen i BAU. Därför återgår efter en inledande period med lägre avverkning avverkningsvolymen till samma nivå som i BAU. Som en följd av detta minskar den positiva effekten på kolsänkan av LÅF+ över tiden. Kolsänkan fram till 2100 ökar med 7,5 Mton CO₂/år jämfört med BAU och kolsänkan i träprodukter blir på samma nivå som i BAU.

LÅF+ leder också till en förändring i åldersklassfördelningen i skogen. På nationell nivå ökar skogsarealen i åldersklasser 60–140 år jämfört med BAU och skogen som är yngre än 60 år eller äldre än 140 år minskar. På grund av förskjutning till de högre åldersklasserna blir nettotillväxten tillfälligt högre än i BAU, men denna effekt avtar med tiden. Effekten på nationell nivå beror dock på olika effekter av åldersförändringar i olika delar av landet. I Götaland blir nettotillväxten och därmed kolsänkan högre än i BAU fram till 2100. Skillnaden är störst vid 2060 och sedan

avtar den tills nettotillväxten blir ungefär på samma nivå som i BAU vid slutet av seklet. I Götaland är effekten av LÅF+ mest kopplad till ändringen i åldersklassfördelning eftersom avverkningen ändras väldigt lite jämfört med BAU i början av simuleringsperioden. Skogen i åldersklassen 60–80 år ökar medan arealen skog äldre än 100 år samt yngre än 20 år minskar. I Svealand och Norrland ökar nettotillväxten och därmed kolsänkan främst i perioden när avverkningen minskar jämfört med BAU och därför verkar effekten av förändringen av åldersklassfördelningen vara marginell i de landsdelarna. I Norrland blir nettotillväxten lägre än i BAU efter 2075 och det gäller även kolsänkan i trädbiomassan. Orsaken till en minskad nettotillväxt är en kombination av ökad areal gammal skog (>100 år) och tillfällig högre avverkning efter 2070 som kan bero på att det inträffar skogsskador enligt modellen.

När omloppstiderna förlängs och skogarna i genomsnitt blir äldre ökar den naturliga avgången. Till viss del kan en högre naturlig avgång ha en positiv effekt på förrådet av död ved och därmed på kolförrådet i skogen och på biodiversiteten (Roberge m.fl., 2016). Risken för skador ökar dock också med biomassa och därmed med åldern (Forzieri m.fl., 2021). Därför är det viktigt att omloppstiderna förlängs i skogar där risken för skador är begränsad. Till exempel, risken för angrepp av granbarkborre ökar med granvolym och minskar med markfuktighet (Müller m.fl., 2022) och därför kan förlängda omloppstider i granskogar på torra marker vara förenat med ökad risk för skador.

Minskade viltskador

Positiva effekter på kolsänkan i Vsk- simulerades främst på lång sikt. Fram till 2100 indikerar resultaten att kolsänkan kan öka med i genomsnitt 5,3 Mton CO₂/år om betesskadorna halveras jämfört med idag. Fram till 2050 kan kolsänkan öka med 2,0 Mton CO₂/år. Åtgärden har en liknande effekt i alla landsdelar.

I Heureka RegVis implementerades åtgärden utan att ändra skötselmetoden. Vid sidan av klövviltsförvaltning, kan åtgärder för att öka andelen lövträd eller tall samt att ha tätare ungskogar vara effektiva strategier för att minska viltskador (Díaz-Yáñez m.fl., 2017; Pfeffer m.fl., 2021). Beroende på vilken skogsskötselmetod som implementeras kan den potentiella kolsänkan ändras. Till exempel, enligt modellresultaten kan en ökad andel björk minska tillväxten och därmed kolsänkan. Däremot är risken för skador mindre i blandskogar vilket kan innebära en lägre men mer stabil kolsänka över tiden. En ökad andel tallskogar kan också förbättra skogens motståndskraft och därmed öka kolsänkan när tall planteras på alla marker som är lämpliga för tall (t.ex. torra marker).

Modellberäkningarna tar inte hänsyn till olika viltskadenivå i olika delar av Sverige, utan samma skadegrad antas i hela Sverige. Inventeringsdata visar dock att andelen årlig älgbeteskada på tallungskog är mycket högre i Götaland (Skogsstyrelsen, 2019). Om denna regionala skillnad beaktas kan man räkna med en större positiv effekt av åtgärder för minskade viltskador i Götaland.

Ökade naturvårdsavsättningar

Modellresultaten indikerar att när mer produktiv skogsmark avsätts men avverkningen samtidigt upprätthålls på samma nivå som idag, minskar kolsänkan i svenska skogar, främst på kort sikt. I Skydd+ minskar kolsänkan i genomsnitt med 4,5 Mton CO₂/år fram till 2050 och med 1,3 Mton CO₂/år fram till 2100. Enligt beräkningarna ökar dock kolförrådet i död ved. Eftersom död ved anses som en av de viktiga indikatorerna för biologisk mångfald (MCPFE, 2003) bekräftar modellresultaten att naturvårdsavsättningarna har en viktig roll för biologisk mångfald.

Resultaten i denna rapport baseras på antagandet att en minskad produktion av träråvaror till följd av utökade avsättningar kan ersättas med ökad avverkning i andra skogar inom samma landsdel. En tidigare studie från Kallio m.fl. (2006) baserad på en modellanalys på europeisk nivå visade att en ökning av avsättningar med 5 procent i Västeuropa kan leda till ett ökat pris på rundvirke med 4 procent och minskad avverkning med 3 procent i samma region som i sin tur leder till läckage i Ryssland där avverkning av rundvirke ökar. Studien antyder att flera faktorer kan påverka virkespris och därmed produktion av träråvaror i samma och andra regioner samt andra länder, men föreslår också att påverkan från skydd av skog på regional nivå borde analyseras bättre. Givet att det är osannolikt att utökade avsättningar kommer att leda till ökad avverkning på övrig skogsmark enbart på lokal nivå borde resultat från modellberäkningar i denna rapport analyseras vidare.

Ökad andel björk

Modellresultaten för Löv+ indikerar att en ökad andel björk i Sveriges skogar leder till en minskad kolsänka med i genomsnitt 6,15 Mton CO₂/år fram till 2100 och en mer begränsad negativ påverkan på kolsänkan på kort sikt (minskning med 2,97 Mton CO₂/år till år 2050). Åtgärden innefattar endast trädslaget björk och här ingår alltså inte föryngring med ädellövträd i södra Sverige. Modellberäkningarna tar inte heller hänsyn till en minskad risk för skador som åtgärden kan leda till. När barrskogar som är eller kommer att bli sårbara för storm, brand eller skadegörare föryngras med en ökad andel lövträd, kommer risken för naturliga skador förmodligen att minska och därmed kommer kolsänkan att vara mer stabil över tiden. Denna effekt är alltså inte inkluderad i denna studie.

Ökad kvävegödsling

Enligt modellen kan GS+ leda till en ökad kolsänka på 2,05 Mton CO₂/år fram till 2100. På lång sikt (till år 2100) ökar GS+ kolförrådet i träd, död ved och produkter med totalt 45 Mton kol eller 2 procent jämfört med BAU. På kort sikt (till år 2050) ökar kolförrådet med 1 procent. Avverkningsnivån var i detta scenario densamma som i BAU och därför resulterar den tillväxtökning som gödslingen ger i en ökad kolsänka och inte i en ökad produktion av träråvaror eller substitution. Den positiva effekten är begränsad till norra Sverige på grund av att 83 procent av arealen som gödslas per år i GS+ befinner sig i den delen av landet. Ökningen av gödslad skogsmark i Götaland och Svealand begränsades till ytterligare 15 000 ha/år jämfört med en ökning på 100 600 ha/år i Norrland. Antagandet att gödsling inte ökas så mycket i Götaland och Svealand är baserat på begränsningarna i de allmänna råden

från Skogsstyrelsen (SKSFS 1991:2). Flera vetenskapliga studier stöder de allmänna råden genom att visa på begränsade effekter av kvävegödsling i södra Sverige (Pettersson & Högbom, 2004) samt ökad risk för kväveläckage (Lucander m.fl., 2021). Ökad risk för kväveläckage och negativa effekter på bete för renar bör också beaktas för att ange möjliga arealer för kvävegödsling i norra Sverige, men några sådana restriktioner fanns inte med vid effektanalysen av GS+. Detta innebär att restriktioner i föreskrifterna och de allmänna råden för att undvika gödsling nära vattendrag och sjöar eller på lavmarker inte följdes i föreskrifterna. Detta medför att den möjliga årliga gödslingsarealen kan vara överskattad i analysen. Resultat om effekten av GS+ i denna rapport bör också tolkas med försiktighet på grund av att kvävegödslingseffekten i Heureka RegVis är baserad på empiriska funktioner som uppskattar volymökning efter kvävegödsling (Pettersson, 1994b, 1994a) men inte beaktar lokala förutsättningar och dynamiska processer som påverkar kvävetillgänglighet. Ytterligare analys som integrerar dynamiska processer i modellering kan bidra till en bättre förståelse av effekten av kvävegödsling i olika delar av landet i ett föränderligt klimat.

Ökad användning av hyggesfritt

Skillnaderna i kolförrådet och kolflöden i HF+ jämfört med BAU är små men det finns en viss variation mellan olika landsdelar och tidsperioder. Modellsimuleringarna indikerar en begränsad positiv effekt av HF+ på kolflöden och kolförråd fram till 2070. Den ökade kolsänkan beror på en ökning i brutto- och nettotillväxt fram till 2060 som kan bero på olika faktorer, såsom minskning av avverkningen eller på hur skogens tillväxt reagerar på selektiv avverkning eller luckhuggning i modellen. Nettotillväxten blir dock något lägre i HF+ än i BAU från 2060 till 2100.

Det finns osäkerheter kring simulering av skogens tillväxt efter upprepade gallringar i modellen på det sätt som sker vid selektiv avverkning. Det finns också osäkerhet kring om alla de ytor där selektiv avverkning och luckhuggning tillämpas i simuleringen, i verkligheten är lämpliga för dessa metoder. Dessutom finns osäkerheter kring den modell för inväxning vid selektiv avverkning, som används i modellen. Modellresultaten i HF+ bör därför tolkas med försiktighet.

Tidigare studier har visat att det finns osäkerhet kring effekter av hyggesfritt jämfört med trakthyggesbruk, särskilt eftersom hyggesfritt inbegriper flera olika skötselmetoder som påverkar skogsekosystemet på olika sätt. Jämförelser mellan selektiv avverkning och trakthyggesbruk antyder att det är osäkert om produktionen av träråvaror är högre vid trakthyggesbruk eller vid selektiv avverkning (Ekholm m.fl., 2023).

Effekten av hyggesfria metoder på kolbalansen, inklusive träprodukter, är också osäker och olika tidigare studier kommer till motsägande resultat beroende på vilka antaganden som görs (T. Lundmark m.fl., 2016; Pukkala, 2014). Vetenskapliga studier visar dock att en ökad areal som sköts med hyggesfria metoder kan vara en effektiv strategi för att bättre uppnå multifunktionalitet i skogen (Díaz-Yáñez m.fl., 2020; Eyvindson m.fl., 2021; Peura m.fl., 2018) och att det kan vara positivt för biologisk mångfald (Seedre m.fl., 2018).

Genom att öka diversiteten på landskapsnivå med en kombination av skötselmetoder kan man också öka motståndskraften mot skador (Messier m.fl., 2019) och därmed skapa en mer stabil kolsänka och kolförråd i skogen. På beståndsnivå kan dock gallringar (och därmed selektiv avverkning) leda till en tillfälligt ökad risk för stormfällningar över 3–5 år beroende på vilken typ av gallring som genomförs och med vilken intensitet (alltså hög och intensiv gallring leder till större ökad risk) (Diaci m.fl., 2017). Det är därför viktigt att genomföra omställningen från en enskiktad till en fullskiktad skog genom ett lågintensivt och frekvent virkesuttag, särskilt i områden där risken för stormfällning är hög (Diaci m.fl., 2017; Skogsstyrelsen, 2020a).

Markkol

Effekten av åtgärderna på markkol exkluderades från resultaten på grund av osäkerheten kring det simulerade startvärdet för markkolpoolen. Tidigare studier som analyserat effekten av skogsbruk på markkol visar att åtgärder som har positiv effekt på tillväxten också har en positiv effekt på tillförsel av kol till marken, men också att en minskad risk för skador kan vara viktigt för att bevara kolförrådet och därmed undvika stora kolförluster (Jandl m.fl., 2007). I framtiden kommer sannolikt klimatförändringar att påverka balansen mellan nedbrytning och mineralisering och därmed kolbalansen i marken. Eftersom markprocesser påverkas av temperatur men också markfuktighet är det oklart hur kolförrådet kommer att påverkas av klimatförändringarna i svenska skogar (Belyazid & Zanchi, 2019). Givet att markkolet är den största delen av skogens kolförråd kan små förändringar i markkolet dock leda till stora kolförluster eller kolinlagring. Därför blir det viktigt att genomföra ytterligare analyser som kan uppskatta effekter av skogliga åtgärder på markkolet i ett föränderligt klimat för att undvika kolförlust från markpoolen.

Klimatförändringarna och skador

I modellsimuleringarna inkluderas effekter av klimatförändringar på skogstillväxten, som i sin tur påverkar skogens kolbalans. Resultaten indikerar att i BAU kommer bruttotillväxten stadigt att öka i framtiden i Norrland och Svealand, vilket borde analyseras vidare, särskilt med hänsyn till säsongvariation i nederbörd såsom ökad risk för torra sommartid. Begränsningsfaktorer som kväve- och vattentillgång och solljus kan i verkligheten begränsa den potentiella tillväxten som styrs av temperaturökning i framtiden. Dessutom användes ett enda utsläppsscenario och en enda klimatmodell för modellsimuleringar i effektanalyserna vilket begränsade möjligheten att uppskatta variationen kring klimatförändringseffekten.

Risken för skador kommer sannolikt att öka i framtiden på grund av klimatförändringarna men i analyserna var frekvensen av skador densamma i alla skogsbruksalternativ. En del åtgärder kan leda till mer varierade skogar (Löv+, HF+, Vsk-) eller ett mer varierat skogslandskap (Skydd+, HF+) som kan minska risken för skador. Däremot kan några åtgärder leda till att skogen blir äldre (LÅF+, Skydd+, HF+) eller att biomassa-förrådet ökar (Avv90%, GS+, Vsk-) och därmed att skador ökar i frekvens. Dessa effekter fångas inte av modellen. Strategier som kan minska skogens sårbarhet kommer med största sannolikhet att vara väldigt

viktiga i ett föränderligt klimat. Motståndskraftiga skogar har potential att bevara kolförrådet som redan finns i svenska skogar och att bidra till en mer stabil kolsänka.

Regionala skillnader

Resultaten indikerar att effekten av utvalda åtgärder skiljer sig åt på regional nivå och att några åtgärder är mer effektiva i några delar av landet än i andra. Att ta hänsyn till regionala förutsättningar blir viktigt för att identifiera vilken kombination av åtgärder som kan leda till störst positiv effekt på kolbalansen i skogen och samtidigt undvika konflikter eller främja synergier med andra miljömål.

Avv90% har positiva effekter på kolsänkan i skogen i hela landet men har största effekten i Götaland (mer än fördubblad 2020–2100) och Svealand (+75 procent) där avverkningsnivå är högst idag. LÅF+ har en positiv effekt som avtar med tiden och som varar längst i Götaland, medan den kan bli negativ i Norrland på lång sikt.

GS+ har positiva effekter på kolsänkan i Norrland men lavmarker bör undvikas av hänsyn till rennäringen. I södra Sverige har GS+ begränsad tillämplighet på grund av aktuella restriktioner. Dessutom kan ökad gödsling på kväverika marker i södra Sverige ha begränsade effekter på tillväxten och negativa effekter på vattenkvalitet.

Modellresultaten indikerar att Vsk- kommer att ha jämna effekter i hela landet, men ytterligare analys som antar olika skadegrad i olika delar av landet borde genomföras för att förstå den regionala effekten av åtgärden. Med tanke på att viltskador är högst i Götaland kan större positiva effekter förväntas i den landsdelen.

Skydd+ har en positiv effekt på kolsänkan i Götaland eftersom åtgärden inte påverkar nettotillväxten och leder till en minskad avverkning. I andra landsdelar har Skydd+ en negativ effekt på nettotillväxten som leder till en negativ effekt på kolsänkan i Norrland. I Svealand kompenseras dock den negativa effekten på nettotillväxten av en kraftigt minskad avverkning i produktiva skogar som sammanlagt leder till en positiv effekt på kolsänkan på lång sikt. Avverkningen i Götaland och Svealand kan inte upprätthållas på grund av den aktuella höga avverkningsnivån. Löv+ leder till minskad kolsänka i hela landet men effekten är störst i Svealand. Ytterligare analys krävs dock för att bättre förstå synergier mellan ökad andel lövträd och minskade viltskador eller ökad motståndskraft mot skador samt i vilka delar av landet som dessa synergier kan bli störst.

HF+ har en begränsad påverkan på kolsänkan i alla landsdelar. Ytterligare analys och vidare modellutveckling behövs för att bättre förstå olika effekter av HF+ i olika landsdelar.

5 Slutsatser

Enligt modellresultaten har Avv90% potential att öka kolsänkan i svenska skogar med 9,6 Mton CO₂/år fram till 2100. Åtgärden har en positiv effekt på kolsänkan både på kort och lång sikt och i alla delar av landet, men störst potential finns i södra Sverige där avverkningsnivån är högst idag.

LÅF+ kan också öka kolsänkan i skogen (med 7,5 Mton CO₂/år fram till 2100) men effekten är främst kopplad till tillfälligt minskad avverkning. Bara i Götaland kan LÅF+ leda till temporärt positiva effekter på kolsänkan utan att avverkningen minskar betydligt. Där beror den högre kolsänkan på en förändring i ålderklassfördelningen som leder till att effekten avtar med tiden. I andra delar av landet innebär dock LÅF+ att avverkningsnivån inte kan upprätthållas för viss tid. Resultaten i Skydd+ indikerar att mer naturvårdavsättningar inte kommer att bidra till en ökad kolsänka om den återstående virkesproduktionsmarken brukas mer intensivt för att upprätthålla dagens avverkningsvolym.

En minskad avverkning kan innebära att utbudet av träråvaror minskar vilket kan leda till en ökad efterfrågan på fossila råvaror eller en ökad import eller minskad export av träråvaror från eller till andra länder. Utsläpp av koldioxid kan därmed flyttas till skogar i andra länder eller till andra sektorer. För att fullt uppnå den positiva effekten av minskad avverkning bör risken för indirekta utsläpp från läckage eller minskad substitution minimeras. Om det finns en politisk vilja att åstadkomma en ökad kolsänka i skogen genom en minskad avverkning förutsätter det att det införs nya styrmedel som saknas idag och som kan skapa incitament för minskad avverkning samt minimera riskerna för läckage och minskad substitution (NV m.fl., 2022).

Avv90% leder också till att svenska skogar blir äldre i genomsnitt. Beroende på skogarnas struktur och sammansättning kan detta ha positiva effekter för flera ekosystemtjänster och biologisk mångfald. Det kan också innebära att mer instabila kolförråd skapas och att risk för skador ökar vilket kan bidra till utsläpp av växthusgaser. Klimatanpassning kommer att krävas både på bestånds- och landskapsnivå oavsett om avverkningen minskas eller ej och kommer att spela en viktig roll för att minska risken för skador.

Andra åtgärder som kan ha en mer långsiktigt positiv effekt på kolsänkan är Vsk- och i mindre grad GS+ (5,3 respektive 2,1 Mton CO₂/år fram till 2100 mer än i BAU). Ytterligare analys skulle dock behövas för att utreda hur viltskador kan minskas i praktiken i olika delar av landet och hur de genomförda åtgärderna skulle påverka skogens kolsänka. Kvävegödsling kan leda till negativa effekter för andra ekosystemtjänster (till exempel vattenkvalitet och bete för renar) vilket begränsar, tillämpligheten av åtgärden också i framtiden och därmed dess potential att öka kolsänkan.

Modellanalyserna tyder på att Löv+ kan påverka kolsänkan negativt, men ytterligare analyser bör genomföras för att kunna bekräfta resultaten, särskilt för södra Sverige. Framskrivningarna inkluderar varken den positiva effekten som ökad andel av lövträd kan ha genom att minska risken för skador eller effekten av ökad andel andra lövträd än björk.

Resultaten tyder också på att HF+ inte har någon betydande påverkan på kolsänkan. Vidare utveckling av modellen kommer att krävas för att bättre beskriva effekter av olika hyggesfria metoder på skogsekosystemen. Pågående utveckling av modeller och fältförsök kommer att bidra till en ökad kunskap om effekten av hyggesfria metoder på kolsänkan.

Modellresultaten indikerar också att olika åtgärder kan vara mer eller mindre effektiva beroende på i vilken landsdel de genomförs. Att identifiera olika strategier i olika delar av landet blir därför avgörande för att kunna upprätthålla och öka kolsänkan på ett effektivt sätt.

Slutligen framgår från framskrivningarna att kolsänkan i svenska skogar kommer att minska över tiden, vilket gäller för samtliga åtgärder som analyserats. Data från Riksskogstaxeringen indikerar att tillväxten har minskat de senaste åren, sannolikt framför allt på grund av ökad torka sommartid. Eftersom det framkommit från tidigare analyser att modellen behöver utvecklas för att bättre beskriva effekten av torka på tillväxten (Skogsstyrelsen, 2015a) finns det en risk att avtagandet av kolsänkan kan bli snabbare än i resultaten som presenteras i denna rapport. Därför blir det ännu viktigare att identifiera åtgärder som kan bevara eller öka kolsänkan i skogen för att uppnå klimatmålen.

Analyserna som presenteras i denna rapport har gjorts utifrån givna förutsättningar som innebär vissa avgränsningar som diskuteras i rapporten. Ytterligare analyser kommer att behövas för att fortsatt öka förståelse och kunskap i frågan.

6 Referenser

Aber, J. D., Nadelhoffer, K. J., Steudler, P., & Melillo, J. M. (1989). Nitrogen Saturation in Northern Forest Ecosystems: Excess nitrogen from fossil fuel combustion may stress the biosphere. *BioScience*, 39(6), 378–386. <https://doi.org/10.2307/1311067>

Ahn, N., Dodoo, A., Riggio, M., Muszynski, L., Schimleck, L., & Puettmann, M. (2022). Circular economy in mass timber construction: State-of-the-art, gaps and pressing research needs. *Journal of Building Engineering*, 53, 104562. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104562>

Akselsson, C., Belyazid, S., Hellsten, S., Klarqvist, M., Pihl-Karlsson, G., Karlsson, P.-E., & Lundin, L. (2010). Assessing the risk of N leaching from forest soils across a steep N deposition gradient in Sweden. *Environmental Pollution*, 158(12), 3588–3595. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.08.012>

Balmford, A., Green, J. M. H., Anderson, M., Beresford, J., Huang, C., Naidoo, R., Walpole, M., & Manica, A. (2015). Walk on the Wild Side: Estimating the Global Magnitude of Visits to Protected Areas. *PLOS Biology*, 13(2), e1002074. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002074>

Belyazid, S., & Zanchi, G. (2019). Water limitation can negate the effect of higher temperatures on forest carbon sequestration. *European Journal of Forest Research*, 138(2), 287–297. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01168-4>

Bergh, J., Freeman, M., Sigurdsson, B., Kellomäki, S., Laitinen, K., Niinistö, S., Peltola, H., & Linder, S. (2003). Modelling the short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries. *Forest Ecology and Management*, 183(1), 327–340. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(03\)00117-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00117-8)

Biber, P., Felton, A., Nieuwenhuis, M., Lindbladh, M., Black, K., Bahyl', J., Bingöl, Ö., Borges, J. G., Botequim, B., Brukas, V., Bugalho, M. N., Corradini, G., Eriksson, L. O., Forsell, N., Hengeveld, G. M., Hoogstra-Klein, M. A., Kadioğulları, A. İ., Karahalil, U., Lodin, I., ... Tuček, J. (2020). Forest Biodiversity, Carbon Sequestration, and Wood Production: Modeling Synergies and Trade-Offs for Ten Forest Landscapes Across Europe. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.547696>

Claesson, S., Sahlén, K., & Lundmark, T. (2001). Functions for Biomass Estimation of Young *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula* spp. From Stands in Northern Sweden with High Stand Densities. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 16(2), 138–146. <https://doi.org/10.1080/028275801300088206>

Coote, L., Dietzsch, A. C., Wilson, M. W., Graham, C. T., Fuller, L., Walsh, A. T., Irwin, S., Kelly, D. L., Mitchell, F. J. G., Kelly, T. C., & O'Halloran, J. (2013). Testing indicators of biodiversity for plantation forests. *Ecological Indicators*, 32, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.020>

- Diaci, J., Rozenbergar, D., Fidej, G., & Nagel, T. A. (2017). Challenges for Uneven-Aged Silviculture in Restoration of Post-Disturbance Forests in Central Europe: A Synthesis. *Forests*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/f8100378>
- Díaz-Yáñez, O., Mola-Yudego, B., & González-Olabarria, J. R. (2017). What variables make a forest stand vulnerable to browsing damage occurrence? *Silva Fennica*, 51(2). <https://doi.org/10.14214/sf.1693>
- Díaz-Yáñez, O., Pukkala, T., Packalen, P., & Peltola, H. (2020). Multifunctional comparison of different management strategies in boreal forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 93(1), 84–95. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz053>
- Edenius, L., Bergman, M., Ericsson, G., & Danell, K. (2002). The role of moose as a disturbance factor in managed boreal forests. *Silva Fennica*, 36(1), 57–67.
- Eggers, J., Melin, Y., Lundström, J., Bergström, D., & Öhman, K. (2020). Management Strategies for Wood Fuel Harvesting—Trade-Offs with Biodiversity and Forest Ecosystem Services. *Sustainability*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/su12104089>
- Ekholm, A., Axelsson, P., Hjältén, J., Lundmark, T., & Sjögren, J. (2022). Short-term effects of continuous cover forestry on forest biomass production and biodiversity: Applying single-tree selection in forests dominated by *Picea abies*. *Ambio*, 51(12), 2478–2495. <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01749-5>
- Ekholm, A., Lundqvist, L., Petter Axelsson, E., Egnell, G., Hjältén, J., Lundmark, T., & Sjögren, J. (2023). Long-term yield and biodiversity in stands managed with the selection system and the rotation forestry system: A qualitative review. *Forest Ecology and Management*, 537, 120920. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120920>
- Eyvindson, K., Dufлот, R., Triviño, M., Blattert, C., Potterf, M., & Mönkkönen, M. (2021). High boreal forest multifunctionality requires continuous cover forestry as a dominant management. *Land Use Policy*, 100, 104918. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104918>
- Felton, A., Petersson, L., Nilsson, O., Witzell, J., Cleary, M., Felton, A. M., Björkman, C., Sang, Å. O., Jonsell, M., Holmström, E., Nilsson, U., Rönnerberg, J., Kalén, C., & Lindblad, M. (2020). The tree species matters: Biodiversity and ecosystem service implications of replacing Scots pine production stands with Norway spruce. *Ambio*, 49(5), 1035–1049. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01259-x>
- Forzieri, G., Girardello, M., Ceccherini, G., Spinoni, J., Feyen, L., Hartmann, H., Beck, P. S. A., Camps-Valls, G., Chirici, G., Mauri, A., & Cescatti, A. (2021). Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nature Communications*, 12(1), 1081. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>

Fridman, J., Westerlund, B., & Appiah Mensah, A. (2022). *Volymtillväxten för träd i Sverige under 00-talet. Ett faktaunderlag med anledning av den minskande nettotillväxten*. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning.

Gill, R. M. A. (1992). A Review of Damage by Mammals in North Temperate Forests: 3. Impact on Trees and Forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 65(4), 363–388. <https://doi.org/10.1093/forestry/65.4.363-a>

Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., ... Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572–597. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>

Gustavsson, L., Haus, S., Lundblad, M., Lundström, A., Ortiz, C. A., Sathre, R., Truong, N. L., & Wikberg, P.-E. (2017). Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 612–624. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.056>

Hassan, R. M., Scholes, R. J., & Ash, N. (2005). *Ecosystems and human well-being: Current state and trends : findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Island Press.

Hedwall, P. O., Nordin, A., Strengbom, J., Brunet, J., & Olsson, B. (2013). Does background nitrogen deposition affect the response of boreal vegetation to fertilization? *Oecologia*, 173(2), 615–624. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2638-3>

Hertog, I. M., Brogaard, S., & Krause, T. (2022). Barriers to expanding continuous cover forestry in Sweden for delivering multiple ecosystem services. *Ecosystem Services*, 53, 101392. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101392>

Hovik, S., Sandström, C., & Zachrisson, A. (2010). Management of Protected Areas in Norway and Sweden: Challenges in Combining Central Governance and Local Participation. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 12(2), 159–177. <https://doi.org/10.1080/15239081003719219>

Husgafvel, R., Linkosalmi, L., Hughes, M., Kanerva, J., & Dahl, O. (2018). Forest sector circular economy development in Finland: A regional study on sustainability driven competitive advantage and an assessment of the potential for cascading recovered solid wood. *Journal of Cleaner Production*, 181, 483–497. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.176>

Jactel, H., Bauhus, J., Boberg, J., Bonal, D., Castagneyrol, B., Gardiner, B., Gonzalez-Olabarria, J. R., Koricheva, J., Meurisse, N., & Brockerhoff, E. G. (2017). Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Current Forestry Reports*, 3(3), 223–243. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0064-1>

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., Johnson, D. W., Minkkinen, K., & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, *137*(3), 253–268. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.09.003>

Jopke, C., Kreyling, J., Maes, J., & Koellner, T. (2015). Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns. *Ecological Indicators*, *49*, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.037>

Kaipainen, T., Liski, J., Pussinen, A., & Karjalainen, T. (2004). Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science & Policy*, *7*(3), 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.03.001>

Kallio, A. M. I., Moiseyev, A., & Solberg, B. (2006). Economic impacts of increased forest conservation in Europe: A forest sector model analysis. *Environmental Science & Policy*, *9*(5), 457–465. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2006.03.002>

Karlsson, P. E., Akselsson, C., Hellsten, S., & Karlsson, G. P. (2022). Twenty years of nitrogen deposition to Norway spruce forests in Sweden. *Science of The Total Environment*, *809*, 152192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152192>

Kempe, G., Nilsson, P., Toet, H., & Westerlund, B. (2000). *Skogsdata*. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning och geomatik.

Kivinen, S. (2015). Many a little makes a mickle: Cumulative land cover changes and traditional land use in the Kyrö reindeer herding district, northern Finland. *Applied Geography*, *63*, 204–211. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.013>

Korosuo, A., Sandström, P., Öhman, K., & Eriksson, L. O. (2014). Impacts of different forest management scenarios on forestry and reindeer husbandry. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *29*(sup1), 234–251. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.865782>

Kuglerová, L., Jyväsjärvi, J., Ruffing, C., Muotka, T., Jonsson, A., Andersson, E., & Richardson, J. S. (2020). Cutting Edge: A Comparison of Contemporary Practices of Riparian Buffer Retention Around Small Streams in Canada, Finland, and Sweden. *Water Resources Research*, *56*(9), e2019WR026381. <https://doi.org/10.1029/2019WR026381>

Lagergren, F., Jönsson, A. M., Blennow, K., & Smith, B. (2012). Implementing storm damage in a dynamic vegetation model for regional applications in Sweden. *Ecological Modelling*, *247*, 71–82. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.08.011>

Larsson, S., Lundmark, T., & Ståhl, G. (2009). *Möjligheter till intensivodling av skog*. Slutrapport från regeringsuppdrag Jo 2008/1885.

Laudon, H., & Maher Hasselquist, E. (2023). Applying continuous-cover forestry on drained boreal peatlands; water regulation, biodiversity, climate benefits and

remaining uncertainties. *Trees, Forests and People*, 11, 100363. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100363>

Leskinen, P., Cardellini, G., González-García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., Smyth, C., Stern, T., Verkerk, P. J., & European Forest Institute. (2018). *Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation* (From Science to Policy) [From Science to Policy]. European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs07>

Lindroth, A., Holst, J., Heliasz, M., Vestin, P., Lagergren, F., Biermann, T., Cai, Z., & Mölder, M. (2018). Effects of low thinning on carbon dioxide fluxes in a mixed hemiboreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.06.021>

Lucander, K., Zanchi, G., Akselsson, C., & Belyazid, S. (2021). The Effect of Nitrogen Fertilization on Tree Growth, Soil Organic Carbon and Nitrogen Leaching—A Modeling Study in a Steep Nitrogen Deposition Gradient in Sweden. *Forests*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/f12030298>

Lundmark, R. (2022). *Läckageeffekter från skog och skogsbruk* (2022/18). Skogsstyrelsen.

Lundmark, T., Bergh, J., Nordin, A., Fahlvik, N., & Poudel, B. C. (2016). Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden. *Ambio*, 45(2), 203–213. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0756-3>

Lundmark, T., Poudel, B. C., Stål, G., Nordin, A., & Sonesson, J. (2018). Carbon balance in production forestry in relation to rotation length. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(6), 672–678. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2017-0410>

Maher Hasselquist, E., Kuglerová, L., Sjögren, J., Hjältén, J., Ring, E., Sponseller, R. A., Andersson, E., Lundström, J., Mancheva, I., Nordin, A., & Laudon, H. (2021). Moving towards multi-layered, mixed-species forests in riparian buffers will enhance their long-term function in boreal landscapes. *Forest Ecology and Management*, 493, 119254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119254>

Marklund, L. G. (1988). *Biomassfunktioner för tall, gran och björk i Sverige*. SLU, Institutionen för skogstaxering.

Mason, W. L., Diaci, J., Carvalho, J., & Valkonen, S. (2022). Continuous cover forestry in Europe: Usage and the knowledge gaps and challenges to wider adoption. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 95(1), 1–12. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab038>

Mazziotta, A., Lundström, J., Forsell, N., Moor, H., Eggers, J., Subramanian, N., Aquilué, N., Morán-Ordóñez, A., Brotons, L., & Snäll, T. (2022). More future synergies and less trade-offs between forest ecosystem services with natural climate solutions instead of bioeconomy solutions. *Global Change Biology*, 28(21), 6333–6348. <https://doi.org/10.1111/gcb.16364>

McMurtrie, R. E., Rook, D. A., & Kelliher, F. M. (1990). Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen. *Management of water and nutrient relations to increase forest growth*, 30(1), 381–413. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90150-A](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90150-A)

MCPFE. (2003). *Improved pan-European indicators for sustainable forest management as adopted by the MCPFE Expert Level Meeting*. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe.

Messier, C., Bauhus, J., Doyon, F., Maure, F., Sousa-Silva, R., Nolet, P., Mina, M., Aquilué, N., Fortin, M.-J., & Puettmann, K. (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, 6(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>

Messier, C., Bauhus, J., Sousa-Silva, R., Auge, H., Baeten, L., Barsoum, N., Bruelheide, H., Caldwell, B., Cavender-Bares, J., Dhiedt, E., Eisenhauer, N., Ganade, G., Gravel, D., Guillemot, J., Hall, J. S., Hector, A., Hérault, B., Jactel, H., Koricheva, J., ... Zemp, D. C. (2022). For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters*, 15(1), e12829. <https://doi.org/10.1111/conl.12829>

Müller, M., Olsson, P.-O., Eklundh, L., Jamali, S., & Ardö, J. (2022). Features predisposing forest to bark beetle outbreaks and their dynamics during drought. *Forest Ecology and Management*, 523, 120480. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120480>

Nilsson, P., Roberge, C., Dahlgren, J., & Fridman, J. (2022). *Skogsdata 2022*. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning.

Nilsson, P., Roberge, C., & Fridman, J. (2021). *Skogsdata 2021*. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning.

Nilsson, U., Berglund, M., Bergquist, J., Holmström, H., & Wallgren, M. (2016). Simulated effects of browsing on the production and economic values of Scots pine (*Pinus sylvestris*) stands. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 31(3), 279–285. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1099728>

Nordkvist, M., Eggers, J., Fustel, T. L.-A., & Klapwijk, M. J. (2023). Development and implementation of a spruce bark beetle susceptibility index: A framework to compare bark beetle susceptibility on stand level. *Trees, Forests and People*, 11, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100364>

Nunes, L. J. R., Causer, T. P., & Ciolkosz, D. (2020). Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109658. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109658>

NV, SKS, & JBV. (2022). *Förslag för ökade kolsänkor i skogs- och jordbrukssektorn Underlagsrapport om LULUCFinom regeringsuppdraget om näringslivets klimatomställning*. Naturvårdsverket.

Petersson, H. (1999). *Biomassfunktioner för trädskott av tall, gran och björk i Sverige* (59). Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning och geomatik.

Petersson, H., Ellison, D., Appiah Mensah, A., Berndes, G., Egnell, G., Lundblad, M., Lundmark, T., Lundström, A., Stendahl, J., & Wikberg, P.-E. (2022). On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden. *GCB Bioenergy*, *14*(7), 793–813. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12943>

Petersson, H., & Ståhl, G. (2006). Functions for below-ground biomass of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *21*(S7), 84–93. <https://doi.org/10.1080/14004080500486864>

Petersson, F. (1994a). *Predictive functions for calculating the total response in growth to nitrogen fertilization, duration and distribution over time* (4). Skogforsk.

Petersson, F. (1994b). *Predictive functions for impact of nitrogen fertilization on growth over five years* (3). Skogforsk.

Petersson, F., & Högbom, L. (2004). Long-term Growth Effects Following Forest Nitrogen Fertilization in *Pinus sylvestris* and *Picea abies* Stands in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *19*(4), 339–347. <https://doi.org/10.1080/02827580410030136>

Peura, M., Burgas, D., Eyvindson, K., Repo, A., & Mönkkönen, M. (2018). Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in Fennoscandia. *Biological Conservation*, *217*, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.10.018>

Pfeffer, S. E., Singh, N. J., Cromsigt, J. P. G. M., Kalén, C., & Widemo, F. (2021). Predictors of browsing damage on commercial forests – A study linking nationwide management data. *Forest Ecology and Management*, *479*, 118597. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118597>

Pingoud, K., Skog, K. E., Martino, D. L., Tonosaki, M., Zhang, X., & Ford-Robertson, J. (2006). *Harvested wood products* (Chp.12, Vol.4; PCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories). IPCC.

Potterf, M., Eyvindson, K., Blattert, C., Burgas, D., Burner, R., Stephan, J. G., & Mönkkönen, M. (2022). Interpreting wind damage risk—how multifunctional forest management impacts standing timber at risk of wind felling. *European Journal of Forest Research*, *141*(2), 347–361. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01442-y>

Pukkala, T. (2014). Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration? *Forest Policy and Economics*, *43*, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2014.03.004>

- Pukkala, T. (2018). Effect of species composition on ecosystem services in European boreal forest. *Journal of Forestry Research*, 29(2), 261–272. <https://doi.org/10.1007/s11676-017-0576-3>
- Reed, S. P., Royo, A. A., Fotis, A. T., Knight, K. S., Flower, C. E., & Curtis, P. S. (2022). The long-term impacts of deer herbivory in determining temperate forest stand and canopy structural complexity. *Journal of Applied Ecology*, 59(3), 812–821. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14095>
- Reynolds, B. (2004). Continuous cover forestry: Possible implications for surface water acidification in the UK uplands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8(3), 306–313. <https://doi.org/10.5194/hess-8-306-2004>
- Roberge, J.-M., Laudon, H., Björkman, C., Ranius, T., Sandström, C., Felton, A., Sténs, A., Nordin, A., Granström, A., Widemo, F., Bergh, J., Sonesson, J., Stenlid, J., & Lundmark, T. (2016). Socio-ecological implications of modifying rotation lengths in forestry. *Ambio*, 45(2), 109–123. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0747-4>
- Rytter, L. (2019). *Lövträd och lövskog—En sammanställning av nuvarande kunskap*. Skogsforsk.
- Saraev, V., Valatin, G., Peace, A., & Quine, C. (2019). How does a biodiversity value impact upon optimal rotation length? An investigation using species richness and forest stand age. *Forest Policy and Economics*, 107, 101927. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.05.013>
- Schier, F., Iost, S., Seintsch, B., Weimar, H., & Dieter, M. (2022). Assessment of Possible Production Leakage from Implementing the EU Biodiversity Strategy on Forest Product Markets. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081225>
- Schulte, M., Jonsson, R., Hammar, T., Stendahl, J., & Hansson, P.-A. (2022). Nordic forest management towards climate change mitigation: Time dynamic temperature change impacts of wood product systems including substitution effects. *European Journal of Forest Research*, 141(5), 845–863. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01477-1>
- Seedre, M., Felton, A., & Lindbladh, M. (2018). What is the impact of continuous cover forestry compared to clearcut forestry on stand-level biodiversity in boreal and temperate forests? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 7(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0138-y>
- Shah, N. W., Baillie, B. R., Bishop, K., Ferraz, S., Högbom, L., & Nettles, J. (2022). The effects of forest management on water quality. *Forest Ecology and Management*, 522, 120397. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120397>
- Sjölander-Lindqvist, A., & Sandström, C. (2019). Shaking Hands. *Conservation & Society*, 17(4), 319–330. JSTOR.
- Skogsstyrelsen. (2000). *Skogliga konsekvensanalyser 1999 – skogens möjligheter på 2000-talet*. (2/2000). Skogsstyrelsen.

-
- Skogsstyrelsen. (2014a). *Blädningsbruk* (11/2014; Skogsskötselserien). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2014b). *Slutavverkning* (Kapitel 14; Skogsskötselserien). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2015a). *Effekter av ett förändrat klimat—SKA 15* (12/2015). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2015b). *Global framtida efterfrågan på och möjligt utbud av virkesråvara* (4). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2015c). *Skogliga konsekvensanalyser 2015-SKA 15* (10). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2019). *Skogsbrukets kostnader för viltskador*. (2019/16). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2020a). *Hyggesfritt skogsbruk* [Broschyr]. Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2020b). *Skogens kolbalansen och klimatet* (Kapitel 21; Skogsskötselserien). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2021). *Hyggesfritt skogsbruk. Skogsstyrelsens definition*. (2021/8). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2022a). *Läckageeffekter från skog och skogsbruk* (2022/18). Skogsstyrelsen.
- Skogsstyrelsen. (2022b). *Skogliga konsekvensanalyser 2022-Material och metod* (Tekniskt underlag 2022/08). Skogsstyrelsen.
- Skytt, T., Englund, G., & Jonsson, B.-G. (2021). Climate mitigation forestry—Temporal trade-offs. *Environmental Research Letters*, 16(11), 114037. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30fa>
- Soimakallio, S., Kalliokoski, T., Lehtonen, A., & Salminen, O. (2021). On the trade-offs and synergies between forest carbon sequestration and substitution. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09942-9>
- Stendahl, J., Nilsson, P., & Cory, N. (2017). *Skogsdata 2017-Tema: Skogsmarkens kolförråd*. SLU Institutionen för skoglig resurshushållning.
- Sténs, A., Roberge, J.-M., Löfmarck, E., Beland Lindahl, K., Felton, A., Widmark, C., Rist, L., Johansson, J., Nordin, A., Nilsson, U., Laudon, H., & Ranius, T. (2019). From ecological knowledge to conservation policy: A case study on green tree retention and continuous-cover forestry in Sweden. *Biodiversity and Conservation*, 28(13), 3547–3574. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01836-2>
- Sweeney, B. W., & Newbold, J. D. (2014). Streamside Forest Buffer Width Needed to Protect Stream Water Quality, Habitat, and Organisms: A Literature Review.

JAWRA *Journal of the American Water Resources Association*, 50(3), 560–584.
<https://doi.org/10.1111/jawr.12203>

Taeroe, A., Mustapha, W. F., Stupak, I., & Raulund-Rasmussen, K. (2017). Do forests best mitigate CO2 emissions to the atmosphere by setting them aside for maximization of carbon storage or by management for fossil fuel substitution? *Journal of Environmental Management*, 197, 117–129.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.051>

Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., Delgado-Arias, S., Bond-Lamberty, B., Wise, M. A., Clarke, L. E., & Edmonds, J. A. (2011). RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1), 77. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>

Thor, M., Ståhl, G., & Stenlid, J. (2005). Modelling root rot incidence in Sweden using tree, site and stand variables. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 20(2), 165–176. <https://doi.org/10.1080/02827580510008347>

Vitkova, L., & Ní Dhubháin, Á. (2013). *Transformation to continuous cover forestry—A review* (Vol.70, 1 & 2; Irish Forestry). UCD Forestry.

Wikberg, P.-E. (2011). *Nationell metod för beräkning av koldioxidutsläpp från träprodukter* (Arbetsrapport 346). SLU Institutionen för skoglig resurshushållning.

Wikström, P., Edenius, L., Elfving, B., Eriksson, L. O., Lämås, T., Sonesson, J., Öhman, K., Wallerman, J., Waller, C., & Klintebäck, F. (2011). The Heureka Forestry Decision Support System: An Overview. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)*; Vol 3, No 2: MCFNS August 28, 2011.
<http://mcfns.net/index.php/Journal/article/view/MCFNS.3-87>

Zanchi, G., & Brady, M. V. (2019). Evaluating the contribution of forest ecosystem services to societal welfare through linking dynamic ecosystem modelling with economic valuation. *Ecosystem Services*, 39, 101011.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101011>